

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Présentée et soutenue par Rahim KACIMI
Le 28 Septembre 2009

Titre : Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil

---

JURY

Mme.	Monique Becker	Professeur, Télécom SudParis	Examinateur
M.	Michel Diaz	Directeur de Recherche LAAS-CNRS	Président
Mme.	Houda Labiod	M.C, Télécom ParisTech, HDR	Rapporteur
M.	Fabrice Valois	Professeur, INSA Lyon	Rapporteur
M.	André-Luc Beylot	Professeur, INP-ENSEEIHT	Examinateur
M.	Riadh Dhaou	M.C, INP-ENSEEIHT	Examinateur

Ecole doctorale : Mathématiques Informatique et Télécommunications
Unité de recherche : IRIT
Directeur(s) de Thèse : André-Luc Beylot
Co-encadrant : Riadh Dhaou

Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil

par

Rahim Kacimi

Thèse en vue de l'obtention du titre Docteur de l'université de Toulouse

Toulouse, France

Septembre, 2009

INPT - 2009

« *el7amdulillahi alladhi tattimu bini3matihi assalli7at* »

Remerciements

Ah ! Les remerciements ! Ça permet à chaque Docteur de remémorer les moments importants qui ont ponctué ses années de doctorat, ainsi que les personnes qui l'ont accompagné et encouragé. Ces années de thèse ont été l'occasion pour moi de rencontrer de nombreuses personnes qui m'ont beaucoup apporté du point de vue scientifique, mais également de partager des amitiés fortes et inoubliables.

En ouverture, avant toute considération subjective, je tiens à remercier très chaleureusement les membres du jury. Merci à Madame Houda Labiod, Maître de conférence à Télécom ParisTech et à Monsieur Fabrice Valois, Professeur à l'INSA-Lyon pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter ce travail. J'aimerais aussi souligner la gentillesse particulièrement touchante de Monsieur Michel Diaz, Directeur de Recherche au LAAS qui a présidé le jury de ma thèse. Mes pensées vont également à Madame Monique Becker, Professeure à Télécom Sud-Paris qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury de thèse et avec qui j'ai eu l'immense privilège de collaborer dans le cadre du projet *Capteurs* dont elle était coordinatrice.

Je tiens à dire toute ma gratitude au Professeur André-Luc Beylot. Sacré ALB ! Je pourrai écrire un huitième chapitre rien que sur ce jeune et talentueux Professeur. Merci ! pour m'avoir encadré « au sens propre du terme » , puis pour m'avoir fait confiance en me confiant ce sujet de thèse et pour m'avoir accompagné, encouragé et conseillé au cours de ces années tant sur le plan technique que humain.

ALB a su guider mon travail avec intelligence et a fait preuve de disponibilité en toute circonstance. Sinon, que mettre en avant parmi ses qualités ? Son enthousiasme communicatif, son énergie débordante, ses qualités humaines ou son sens aigu pour les « perfs » et l'efficacité (toujours inversement proportionnelle à la durée !) ... L'homme qui m'a initié aux « perfs » les applique même pendant nos escapades pour les réunions et les conférences : timing de la navette aéroport à l'arrêt Jean Jaurès, circulation et conditions météo, taille des files d'attente aux guichets d'enregistrement, emplacement de l'hôtel, heure du p'tit dèj., nombre de correspondances RER, Bus et Metro ... Enfin tout est calculé avec les intervalles de confiance svp ! Il m'a offert le luxe de participer à de nombreuses conférences et workshops, de Toulouse à Las Vegas ! En passant par Montpellier, Paris, Le Havre, Karlskrona, Nouvelle Orléans, Aachen avec une escapade à Liège le temps d'un repas juste pour que Riadh mange des moules frites ! ... Je souhaite à tout doctorant la chance d'avoir un tel directeur de thèse, dont l'encadrement et la disponibilité feraient des envieux ... Est il est normal de finir avec ALB sans dire qu'il est le spécialiste français des réseaux véhiculaires ? bien sûr que ce n'est pas normal ! Car il ne manque pas de le souligner à chaque pot et à chaque séminaire.

Je remercie vivement Riadh Dhaou qui a co-encadré ce travail en apportant sa vision du monde

des réseaux sans fil. Mais, plus que le co-encadrant de ce travail, il a été d'une sollicitude et d'une disponibilité hors pair. Comme un ami et un compagnon de voyage, il a toujours répondu présent dans les moments de stress et de doutes. Avec son sac de 35 kg, il est toujours prêt à répondre à mes questions ... Merci d'avoir une si importante confiance en moi et pour les enseignements auxquels tu m'as fait participer, *aussi !;-)*

Merci également à tous les autres membres du projet *Capteurs*, Monsieur Didier Perino dont les connaissances suscite énormément de respect, Monsieur Michel Marot et son extrême gentillesse, Madame Maryline Maknavicius. Puis les plus jeunes, Vincent, Alexandre et Chakib. Je remercie également Ashish Gupta pour la collaboration dans les études expérimentales que nous avons conduites ensemble sur les réseaux de capteurs.

À présent, je m'arrête pour saluer tous les acteurs de mon quotidien au laboratoire, c'est l'occasion de remercier toutes les personnes que j'ai pu croiser durant ces années et qui ont toutes, à leur manière, embelli ces années de thèse. Merci au Professeur Michel Daydé, Directeur du laboratoire IRIT-ENSEEIHT, celui qui rajeunit au fil des années, c'est lui dans « *L'étrange Histoire de Benjamin Button* » ... puis à ses chevaliers de la table ronde : Sylvie, Sam, Nicole, Jean-Claude, Stéphane et Emmanuel pour l'aide précieuse qu'ils apportent à tous les doctorants ainsi qu'au personnel du 27, rue Aubuisson.

Merci également à tous les autres membres du laboratoire, pour leurs conseils, encouragements, et pour la sympathie qu'ils m'ont témoigné. Je commence par mon équipe IRT *(Slogan : toutes les courbes sont des droites passant par l'origine ...)* : Christian Fraboul (notre cher directeur du département TR, *n'envoyez pas de mails mais allez plutôt le voir à son bureau, il est très serviable et gentil*), Jean-Luc (bientôt HDR ! Amène !), Manu (Mon copain Manu ! l'homme aux bonnes affaires, c'est lui qui m'a vendu mon premier canon 400D ... il m'a proposé aussi son ancien salon mais j'ai résisté) il m'a également donné l'occasion d'enseigner du Réseau ! du vrai ! Julien (la gentillesse personnifiée), Béatrice, Anas et son rire si spécial, Xavier (extrêmement sérieux, toujours prêt à vous filer des enseignements même après la soutenance), Jérôme (toujours prêt à partager un mail, une blague ou une vidéo), Marc & Claudia (ils ont quitté l'équipe pour de nouveaux horizons) ... Je n'oublierai pas les membre externes : Lorent, Frédéric B. et Claire ... Merci à Violette, Frédérique et Stéphanie que je côtois lorsque je mets ma casquette d'enseignant à l'ENSSEIHT.

Je passe à l'équipe SC avec Nathalie & Corinne (souriantes et spécialistes de la nutrition saine et diététique ... vous pouvez venir à la cafet' à midi pour voir), Marie (la visionnaire de la mode féminine qu'on croise tous les jours à 16h tapante lorsqu'elle arrive dans la cafet' pour son *tea time*), Jean-Yves, Martial, le jeune MdC. Nicolas D., mes voisins du bureau à côté : Marie-Laure et ses fous rires à cause

de Daniel et Benoît (le mannequin de l'équipe SC celui qui n'a jamais était victime des apparences), ... leur pape à tous c'est LE Professeur Bernard Lacaze, *celui qui veut le voir doit se lever tôt !*

Je passe à présent à toute la communauté des doctorants ... à commencer bien sûr par les anciens : Farid, Hussein, Garmy, Mathieu, Wil, Florent, Vincent-M, Vincent-H, p'tit Manu, Lucile, Ferdinand, Par la suite, il y a ma génération : Jean Remi, Jérôme, Tarek, *Akh* Mahmoud, les informaticiennes Sandrine et Pascaline ... Ensuite, les proches de ma génération ;) à commencer par Alexandra -l'autre pilier du grand bureau des thésards- avec laquelle j'ai eu la chance de partager le bureau. Merci pour les petits biscuits et chocolats, merci d'avoir supporté mon stress et mes blagues et d'avoir été à l'écoute pendant ces années de thèse. Merci à Sakuna pour sa bonne humeur quotidienne, la spécialiste des diamants et des sacs L.V., Merci à notre ami Wasimon (le seul doctorant qui défie les prix du département féminin), Merci à Cholatip, ... Merci à Henri pour les moments de repas culturels et spirituels qu'on a passé au restaurant universitaire d'Arsenal, je les remercie également Véronique et lui pour leur amitié et leurs invitations à leur table accompagnée des sourires angéliques de leur petit Benjamin ... Merci et bon courage aux nouveaux thèsards auxquels je souhaite de passer de très bons moments en thèse et beaucoup de réussite, mon petit frère Amadou, Fabian le future multilingue, Xiaoting, Warodom, *Akh* Khalid, Razvan, Vincent, Michael, Bafing, Benaissa, ... Comment sortir de l'IRIT sans parler de la personne qui pique les *yaourts* au frigo ! Merci à toi mangeur (se) de *yaourts* d'avoir pimenté notre quotidien et suscité beaucoup d'interrogations.

Merci à tous les amis et les copains de la cité U. de Rangueil, de la cité U. d'Arsenal, mes amis les toulousains, ma famille et mes amis lyonnais, mes copains parisiens ... merci également à tous les copains qui sont restés aux pays et qui m'ont toujours soutenu ... Je fais un clin d'œil au « vieux professeur embauché par l'université de Niamey » , mon ancien collègue de bureau, mon ami et mon grand frère Mahamadou Issoufou Tiado ... Un grand merci à Aziz Kassimi, qui m'a soutenu depuis le début, avant même que je quitte mon pays. Il a fait tout son possible pour que je m'installe dans les meilleures conditions pendant mes premières années en France ... Merci pour tout !

Toutefois, j'espère que personne ne se sentira offusqué d'avoir été omis et j'espère que l'émotion d'avoir terminé ce travail justifiera quelques oublis s'il y en a.

Un grand merci pour mes parents et mes frères, leur soutien et leur aide, tout particulièrement durant mes dernières années d'études. C'est donc avec le plus grand plaisir que je remercie ma très chère maman qui n'a jamais cessé de prendre de mes nouvelles dès que je rate le coup de fil du samedi, merci à mon cher paternel, un homme modeste que je regarderai toujours avec des yeux qui brillent ... *dans son vieux pardessus râpé ... mon vieux ...*

Mes derniers remerciements vont à Nassima, qui m'accompagne avec tant de bonheur depuis un bon bout de temps maintenant. Un ange qui me fait oublier la fatigue et le stress de tous les jours. Merci pour ta patience et ton aide à nulle autre pareille. Les derniers mois de thèse furent, à tes côtés, un ravissement et une joie que nous continuons à partager.

Je dédie cette thèse à mes grands-parents qui, malgré les vicissitudes de la vie, m'ont toujours témoigné un soutien et un amour inestimable. A *setti*[1] Yamina et *jeddi*[2] Abdelkader donc, mes très chers grand-parents maternels et à ma très chère grand-mère *setti* Baya si rudement mise à l'épreuve ces dernières années. Ils resteront tous pour moi, mais aussi pour beaucoup d'autres, des modèles, et dont je suis si fier d'être le petit fils.

À vous tous, merci !

[1] mami
[2] papi

Résumé

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années ont permis le développement de nouveaux types de capteurs dotés de moyens de communication sans fil, peu onéreux et pouvant être configurés pour former des réseaux autonomes. Les domaines d'application sont nombreux : domotique, santé, domaine militaire ou bien encore surveillance de phénomènes environnementaux. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie. La liberté laissée à l'implantation est forte et impose de concevoir complètement l'infrastructure, les mécanismes et les protocoles en fonction de l'application visée.

Dans cette thèse, nous nous sommes tout d'abord focalisés sur des réseaux de petites tailles. Nous avons conçu une solution protocolaire « Placide » pour le suivi de la chaîne du froid proposée dans le cadre du projet ANR-CAPTEURS. L'originalité première de la solution repose sur l'absence d'infrastructure et de Station de Base. Elle est composée de protocoles performants fondés sur la formation d'un anneau virtuel entre les nœuds, auto-organisants et très économes en énergie.

Le second axe est dédié à une étude expérimentale de la qualité du lien. L'objectif est double. Nous souhaitions tout d'abord étayer certaines hypothèses effectuées dans la première partie du travail. Il s'agissait ensuite de proposer des protocoles et des algorithmes fondés sur la qualité du lien. Nous nous sommes focalisés sur la variation de la qualité du lien en fonction de la distance entre les nœuds et de la puissance de transmission. Par la suite, l'impact de la qualité du lien sur la topologie du réseau a été étudiée. Les retours d'expérience sont importants quant à la compréhension des facteurs affectant la durée de vie du réseau.

La dernière contribution concerne l'exploitation de ces observations en proposant des stratégies de partage de charge. Notre idée est que des protocoles très réduits et des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour le routage. Nous illustrons ces principes au travers d'exemples pour lesquels nous montrons la supériorité de ces solutions par rapport à des routages de type plus court chemin.

Abstract

TECHNOLOGICAL advances during the last few years allowed the development of new and cheap sensors equiped with wireless communication which can be configured to form autonomous networks. The application areas for wireless sensor networks *(WSN)* are various : home automations, health care services, military domain, and environment monitoring. The imposed constraints are limited capacity of processing, storage, and especially energy. In addition, implementing *WSN* solutions is highly open and requires that the infrastructure, the mechanisms and the protocols should be completely designed based on each specific application.

In this thesis, we first focused on small networks. We designed *"Placide"*, a protocol stack solution for cold chain monitoring proposed within the ANR-CAPTEURS project. The first originality of this solution is based on the absence of infrastructure and base stations. *"Placide"* is composed of self-organizing and energy-efficient protocols based on a virtual ring construction between nodes. The second topic is devoted to an experimental study on Link Quality Indicator *(LQI)*. There are two main objectives. Firstly, we want to endorse our precise assumptions of the first part of the work. Secondly, our poposed link quality based protocols and algorithms will be described. We focused on LQI variations according to distance between nodes and transmission power. Thereafter, the impact of LQI on the network topology has been studied. Feedbacks are important to understand which factors affect the network lifetime.

The last contribution relates to the use of these observations by proposing load balancing strategies. Our idea is that very reduced protocols and simple mechanisms can be used in routing protocols. We illustrate these principles through simple examples where we show the superiority of these solutions compared to standard routing like shortest path for example.

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Introduction aux réseaux de capteurs sans fil **5**

2.1 Introduction . . . 5

2.2 Architecture d'un nœud-capteur . . . 6

2.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs . . . 8

2.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs . . . 8

2.3.2 Les différents facteurs de conception . . . 8

2.3.3 Architecture protocolaire . . . 9

2.4 Applications des réseaux de capteurs sans fil . . . 10

2.5 Les réseaux de capteurs *"Mostly-off"* et *"Mostly-on"* . . . 12

2.6 Consommation d'énergie d'un nœud-capteur . . . 13

2.6.1 Formes de dissipation d'énergie . . . 13

2.6.2 Sources de surconsommation d'énergie . . . 14

2.6.3 Mécanismes de conservation de l'énergie . . . 15

2.7 Conclusion . . . 17

3 Techniques de conservation d'énergie existantes **19**

3.1 Introduction . . . 19

3.2 Notion de durée de vie d'un réseau . . . 20

3.3 Conservation d'énergie . . . 22

3.4 Techniques du *Duty-cycling* . . . 23

3.4.1 Protocoles *Sleep/Wakeup* . . . 23

3.4.2 Protocoles du niveau MAC . . . 24

3.5 Techniques orientées données . . . 28

3.5.1 Réduction des données . . . 28

3.5.2 Acquisition de données efficace en énergie . . . 29

3.6 Techniques de mobilité . . . 30

3.7 Conclusions . . . 32

4 Solution protocolaire pour le suivi de la chaîne du froid 33
4.1 Introduction . . . 33
4.2 Problématique et scénario retenu . . . 34
4.3 Analyse du scénario . . . 35
4.4 Solutions . . . 36
4.4.1 Réveils groupés . . . 37
4.4.2 Création d'un anneau virtuel . . . 37
4.5 Évaluation de performances . . . 46
4.5.1 Modèle analytique . . . 47
4.5.2 Environnement de simulation . . . 48
4.5.3 Amélioration des performances . . . 55
4.6 Implantation et tests . . . 61
4.7 Conclusion . . . 62

5 Étude expérimentale sur la qualité du lien 65
5.1 Introduction . . . 65
5.2 Problématique et état de l'art . . . 66
5.3 La qualité du lien . . . 67
5.3.1 Le *chipcon CC2420* . . . 68
5.3.2 Tests préliminaires . . . 69
5.4 Expérimentations sur des réseaux de plusieurs nœuds . . . 72
5.4.1 Mise en œuvre des expérimentations . . . 72
5.5 Analyse et observations . . . 75
5.5.1 Évolution en fonction du temps . . . 75
5.5.2 Impact de la position de la Station de Base . . . 76
5.5.3 Impact d'une puissance d'émission forte de la Station de Base . . . 77
5.5.4 Impact des différents niveaux de puissance dans le cas d'un réseau hétérogène . . . 79
5.6 Conclusion . . . 82

6 Maximisation de la durée de vie par équilibrage de charge 85
6.1 Introduction . . . 85
6.2 Etat de l'art . . . 87
6.3 Problématique . . . 88
6.4 Formulation du problème . . . 90

6.4.1 Les hypothèses de notre modèle 90
6.4.2 Choix d'une définition pour la durée de vie du réseau 91
6.4.3 Formulation 92
6.5 Stratégies de résolution 93
6.5.1 Routage de type plus court chemin 93
6.5.2 Solution optimale 94
6.5.3 Proposition d'une heuristique d'équilibrage de charge 98
6.6 Résultats 100
6.7 Discussion et directions futures 103
6.7.1 Cas d'une topologie en grille avec une Station de Base au centre 104
6.7.2 Cas de topologies irrégulières 106
6.8 Conclusion 106

7 Conclusions et Perspectives **109**

Bibliographie **115**

A Détails des protocoles de la solution « PLACIDE » **127**
A.1 Automates de protocoles 127

Table des figures

2.1 Architecture d'un réseau de capteurs. 8

2.2 La pile protocolaire des réseaux de capteurs. 10

2.3 À gauche - Transmissions directes. Au centre - Transmission saut par saut. À droite - Hiérarchisation en *clusters*. 17

4.1 Solution avec un ordonnacement du sommeil. 37

4.2 Solution avec un ordonnacement du sommeil. 38

4.3 Illustration de l'initialisation du réseau. 41

4.4 Régime permanent. 43

4.5 Disparition d'un capteur. 44

4.6 Fusion de deux Cycles. 47

4.7 Temps d'initialisation d'un réseau de capteurs avec différentes tailles et différentes valeurs de T_{max} - Modèle analytique. 50

4.8 Résultats du modèle analytique et simulations : temps d'initialisation de chaque nœud d'un réseau de 33 nœuds avec $T_{max} = 75ms$. 50

4.9 Consommation d'énergie du dernier nœud lors de l'initialisation du réseau avec différentes tailles de réseau et différentes valeurs de T_{max} - Modèle analytique. 51

4.10 Résultats du modèle analytique et simulations : consommation d'énergie de chaque nœud d'un réseau de 33 nœuds avec $T_{max} = 75ms$. 52

4.11 Nombre de collisions en fonction de la taille du réseau et de la valeur de T_{max}. 53

4.12 Analyse du régime permanent. 54

4.13 Analyse du régime permanent avec des réveils au plus tôt. 55

4.14 Résultats Analytiques. Évolution du temps moyen d'attente en fonction de la taille du réseau. 56

4.15 Régime permanent avec des acquittements implicites. 57

4.16 Exemple de calcul de probabilité $Pr[N_1 = 4]$. 58

4.17 À gauche - Comparaison analytique entre $\bar{E}$, $\bar{E}'$ et $\bar{E}''$. À droite - Comparaison des résultats des trois modèles avec les résultats de Tossim. 59

4.18 Répartition de la consommation d'énergie. 61

5.1 À gauche - Réseau de capteurs avec trois nœuds et la qualité du lien entre eux. À droite - Qualité du lien entre les nœuds en fonction du temps. 69
5.2 À gauche - Qualité du lien en fonction de la puissance d'émission. À droite - Qualité du lien en fonction de la distance. 70
5.3 À gauche - Qualité du lien en fonction de la distance à l'extérieur avec une puissance d'émission de $0dBm$. À droite - Taux de paquets reçu en fonction du LQI moyen. . . . 71
5.4 À gauche - Topologie linéaire. À droite- Topologie sous forme de grille uniforme. 73
5.5 Un capteur *"Tmote Sky"*. 73
5.6 Environnements du déploiement. À gauche - Un couloir de $35m$ de long. À droite - Une cour en plein air de 30x30m. 75
5.7 Evolution du LQI dans le temps. 76
5.8 Impact de la position de la Station de Base. 77
5.9 Impact d'une puissance d'émission forte de la Station de Base 78
5.10 Variation du LQI dans le temps, *(scénario 33)*. 80
5.11 Effets de la puissance d'émission de la Station de Base. 81
5.12 Nombre moyens de sauts et nombre de chemins multi-sauts en fonction de la puissance d'émission des nœuds et de celle la BS. 82

6.1 À droite - Nœuds critiques dans une topologie sous forme de grille et avec une Station de Base dans le coin. À gauche - Impact de la puissance d'émission. 88
6.2 Réseau de capteurs avec une topologie régulière *(Station de Base dans le coin)*. 90
6.3 Stratégie du plus court chemin. 93
6.4 Analyse du cas optimal. 95
6.5 Analyse du cas optimal. 96
6.6 Matrice stochastique pour la solution optimale. 98
6.7 L'heuristique d'équilibrage de charge. (c contribution sur un lien et S somme des contributions.) 99
6.8 Énergie consommée (en unité) par chaque nœud dans une grille de 10x10 nœuds, chaque nœud génère 1000 paquets. 101
6.9 Énergie consommée avec 1 paquet généré par chaque nœud. 102
6.10 Énergie maximale consommée par un nœud dans une grille (10×10). 103
6.11 Réseau de capteurs avec une topologie régulière *(la Station de Base au centre)*. 104
6.12 Représentation des nœuds critiques *(nœuds en blanc)* dans le cas d'une BS au centre. . . 104
6.13 Énergie maximale consommée par un nœud dans une grille (11×11), BS située au centre. 105

A.1 Automate d'initialisation. 127
A.2 Régime permanent pour le premier capteur de la chaîne. 128
A.3 Régime permanent pour un capteur dans la chaîne. 128
A.4 Régime permanent pour le dernier capteur de la chaîne. 129

Table des acronymes

APDU Application Protocol Data Unit

B-MAC Berkeley MAC

BS Base Station

CAP Contention Access Period

CFP Contention Free Period

CSMA Carrier Sense Multiple Access

CSMA/CA CSMA with Collision Avoidance

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency

ECN Explicit Contention Notification

FEC Forward Error Correction

FFD Full Function Device

GSM Global System for Mobile communications

HCL High Contention Level

ISM Industrial, Scientific and Medical radio bands

LAN Local Area Network

LEACH Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LPL Low Power Listening

LQI Link Quality Indicator

MAC Media Access Control

MANET Mobile Ad-hoc NETworks

MCU MicroController Unit

MEMS MicroElectroMechanical Systems

OQPSK Offset Quadrature Phase Shift Keying

PAN Personal Area Networks

PDA Personal Digital Assistant

PDR Packet Delivery Ratio

PDU Protocol Data Unit

PER Packet Error Rate

PRR Packet Reception Ratio

QNAP2 Queuing Networks Analysis Package

RNIS Réseau numérique à Intégration de Services

RSSI Received Signal Strength Indication

RTS/CTS Request To Send, Clear To Send

S-MAC Sensor MAC

SensIT Sensor Information Technology

SFD Start Frame Delimiter

STEM Sparse Topology and Energy Management

T-MAC Timeout MAC

TDMA Time Division Multiple Access

TPL Transmission Power Level

TRAMA TRafic Adaptive Medium Access

Z-MAC Zebra MAC

Chapitre 1

Introduction

Les avancées technologiques et techniques opérées dans le domaine des réseaux sans fil, de la microfabrication et de l'intégration des microprocesseurs ont fait naître une nouvelle génération de réseaux de capteurs à grande échelle adaptés à une gamme d'applications très variée [Kri06]. Imaginons un ensemble de petits appareils électroniques, autonomes, équipés de capteurs et capables de communiquer entre eux sans fil. Ensemble, ils forment un réseau de capteurs sans fil capable de superviser une région ou un phénomène d'intérêt, de fournir des informations utiles par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs et de les communiquées ensuite via le support sans fil.

Cette nouvelle technologie promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure. Des capteurs communicants sans fil et dotés de capacités de calcul facilitent une série d'applications irréalisables ou trop chères il y a quelques années. Aujourd'hui, des capteurs minuscules et bon marché peuvent être littéralement éparpillés sur des routes, des structures, des murs ou des machines, créant ainsi une sorte de « seconde peau numérique » capable de détecter une variété de phénomènes physiques. De nombreux domaines d'application sont alors envisagés tels que la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodivesité, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et les transports intelligents.

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements limités en terme de ressources. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie car ils sont généralement alimentés par des piles. Recharger les batteries dans un réseau de capteurs est parfois impossible en raison de l'emplacement des nœuds, mais le plus souvent pour la simple raison que cette opération est pratiquement ou économiquement infaisable. Il est donc largement reconnu que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs sans fil en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur l'exploitation du réseau. En fait, la consommation d'énergie des capteurs joue un rôle important dans la durée de vie du réseau qui est devenue le critère de performance prédominant

dans ce domaine. Si nous voulons que le réseau fonctionne de manière satisfaisante aussi longtemps que possible, ces contraintes d'énergie nous obligent à faire des compromis entre différentes activités aussi bien au niveau du nœud qu'au niveau du réseau.

Plusieurs travaux de recherche sont apparus avec un objectif : optimiser la consommation énergétique des nœuds à travers l'utilisation de techniques de conservation innovantes afin d'améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie. De façon générale, économiser l'énergie revient finalement à trouver le meilleur compromis entre les différentes activités consommatrices en énergie. La littérature des réseaux de capteurs sans fil reconnaît que la radio est un consommateur d'énergie prééminent [RSPS02, SCI+01].

La communauté des chercheurs a proposé un grand nombre de protocoles à tous les niveaux, de la couche physique jusqu'à la couche application, ils se classent naturellement en deux catégories. La première classe de protocoles émane du domaine des réseaux ad hoc, mais l'application de ces protocoles aux réseaux de capteurs sans fil engendre, sans surprise, une complexité et des coûts énergétiques notoires. La deuxième classe de protocoles est propre aux réseaux de capteurs, ils sont souvent dirigés et élagués pour une application précise. Par conséquent, ils ne peuvent pas être appliqués et déployés de manière appropriée à tout contexte applicatif et nombre d'entre eux ont été largement déployés en raison des inconvénients liés aux problématique de durabilité du réseau. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, des protocoles tenant compte de l'efficacité énergétique sont nécessaires. En revanche, la liberté laissée à l'implantation est forte et impose de concevoir complètement l'infrastructure, les mécanismes et les protocoles en fonction de l'application visée puisque c'est la durabilité de cette dernière qui est en jeu.

Armés de toutes ces raisons, nous consacrons largement la présente thèse à l'efficacité énergétique des communications dans le réseau et nous faisons de la conservation d'énergie, la ligne directrice de notre travail. Dans le premier volet de cette problématique, nous choisissons un contexte applicatif précis et nous nous proposons de concevoir une solution protocolaire complète et originale. La conception d'une telle solution doit tenir compte des contraintes d'énergie. Cela passe par une mise en œuvre d'une architecture efficace et performante du réseau d'une part, puis un choix pertinent parmi les techniques de conservation d'énergie existantes et des améliorations de leurs performances en s'intéressant à tous les phénomènes de surconsommation d'énergie. Par ailleurs, il y a lieu de consolider ce travail avec une étude analytique détaillée facilitant la compréhension de la dissipation d'énergie dans le réseau et permettant d'apporter les améliorations nécessaires aux mécanismes proposés.

Dans le second volet et toujours sur la même ligne directrice, nous contribuons à l'optimisation des performances des réseaux de capteurs en terme de durée de vie. Nous reconsidérons dans cette partie

certains mécanismes et protocoles de routage.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR CAPTEURS qui a pour objectif de proposer des solutions innovantes en termes de routage, d'auto-adressage, d'auto-configuration, de qualité de service, de fusion et d'agrégation de données pour des réseaux de capteurs sans fil destinés au suivi de la chaîne du froid.

Ce manuscrit est organisé en sept chapitres. Dans le chapitre 2 nous présentons une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons d'abord par la définition des différentes notions et concepts gravitant autour de cette thématique, ensuite nous exposons les formes de dissipations d'énergie dans les réseaux de capteurs. Nous poursuivons notre état de l'art dans le chapitre 3 en définissant la durée de vie des réseaux de capteurs et en synthétisant les différentes techniques et mécanismes de conservation d'énergie que nous avons recensés dans la littérature.

Le chapitre 4 constitue le cœur de notre travail de thèse. Dans ce chapitre, nous présentons une solution protocolaire complète pour des réseaux de capteurs sans fil. Après avoir situé la problématique dans le contexte de la chaîne du froid, nous procédons à la conception des protocoles nécessaires depuis la construction de la topologie du réseau jusqu'à la collecte de données. Nous développons également plusieurs modèles analytiques afin d'évaluer les performances de la solution et de consolider nos résultats de simulation.

Le second axe de nos travaux est composé de deux parties. La première partie, présentée dans le chapitre 5, est consacrée à une étude expérimentale avec des déploiements réels de réseaux de capteurs. Dans ces expérimentations, nous analysons la variation de la qualité du lien en fonction de la puissance d'émission et la distance entre les nœuds, puis l'impact qu'elle a sur les changement topologiques du réseau et enfin les problématiques qu'elle engendre comme l'apparition de nœuds critiques dont dépend finalement la durée de vie du réseau. La deuxième partie est décrite dans le chapitre 6, elle concerne l'exploitation des observations et des conclusions tirées des expériences en proposant des stratégies de partage de charge. L'idée est que des protocoles très réduits et des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour le routage. Une solution optimale et quelques mécanismes de partage de charge sont alors présentés pour garantir une longévité plus importante au réseau. Au travers d'exemples simples nous confirmons la supériorité de ces solutions par rapport à des mécanismes classiques de routage.

Le chapitre 7, conclut cette thèse en présentant les perspectives de recherche de ce travail.

Chapitre 2

Introduction aux réseaux de capteurs sans fil

Sommaire

2.1 Introduction 5

2.2 Architecture d'un nœud-capteur 6

2.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs 8

2.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs 8

2.3.2 Les différents facteurs de conception 8

2.3.3 Architecture protocolaire 9

2.4 Applications des réseaux de capteurs sans fil 10

2.5 Les réseaux de capteurs *"Mostly-off"* et *"Mostly-on"* 12

2.6 Consommation d'énergie d'un nœud-capteur 13

2.6.1 Formes de dissipation d'énergie 13

2.6.2 Sources de surconsommation d'énergie 14

2.6.3 Mécanismes de conservation de l'énergie 15

2.7 Conclusion 17

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée et omniprésente. De très nombreux états de l'art ont été proposés [ASSC02a, ASSC02b, CES04, Kri06, HW05], nous allons

donc retracer dans le présent chapitre le fonctionnement des réseaux de capteurs en nous focalisant sur les mécanismes et les principes proposés pour économiser de l'énergie.

La mise en œuvre de simples possibilités de traitement, de stockage, de détection et de communication dans des dispositifs à petite échelle, à faible coût et leur intégration dans ce qu'on appelle des réseaux de capteurs sans fil ouvrent la porte à une multitude de nouvelles applications. Les réseaux de capteurs constituent une catégorie de réseaux sans fil comportant d'un très grand nombre de nœuds. Ils sont également caractérisés entre autre par un déploiement très dense et à grande échelle dans des environnements souvent limités en terme de ressources. Ces nœuds déployés autour ou dans une zone à observer sont utilisés pour l'acquisition de données et leur transmission à une station de traitement appelée communément « Station de Base ». Les spécificités les plus frappantes de ces nœuds sont leurs capacités d'auto-organisation, de coopération, leur rapidité de déploiement, leur tolérance aux erreurs et leur faible coût.

En terme de domaines d'applications, les réseaux de capteurs ont connu un très grand succès, car ils détiennent un potentiel qui révolutionne de nombreux secteurs de notre économie et notre vie quotidienne, de la surveillance et la préservation de l'environnement, à la fabrication industrielle, en passant par l'automatisation dans les secteurs de transport et de la santé, la modernisation de la médecine, de l'agriculture, de la télématique et de la logistique [HW05].

Un concept intéressant que nous indroduisons dès à présent est le concept de « nœud-capteur » par référence au terme anglais *"sensor node"* qui revient fréquemment dans la littérature. Nous avons opté pour cette appellation non pas uniquement pour dire que c'est une entité d'un réseau qui fait de la détection mais aussi pour retracer l'histoire du capteur. En effet, *« Hier, on cantonnait les capteurs au simple rôle de détecteurs : température, fumée, intrusion.... On leur demande aujourd'hui de relever plusieurs informations, de communiquer entre eux, et même d'analyser leurs données ! »* [Mas06]. Toutefois, nous gardons à travers ce manuscrit d'autres appellations telles que « nœud » et « capteur » tout simplement, qui renvoient toutes finalement à la même chose.

2.2 Architecture d'un nœud-capteur

Un nœud-capteur est composé de plusieurs éléments ou modules correspondant chacun à une tâche particulière d'acquisition, de traitement, ou de transmission de données. Il comprend également une source d'énergie [ASSC02b, CES04].

L'unité d'acquisition des données : le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent

le même : il s'agit de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques (par exemple pour une thermistance, une variation de température entraîne une variation de la résistance). Les variations de tension sont ensuite converties par un convertisseur Analogique-Numérique afin de pouvoir être traitées par l'unité de traitement. On trouve aussi des structures plus complexes pour détecter d'autres phénomènes : les *MEMS* (pour *Microelectromechanical systems*) [ASSC02a, ASSC02b]. Ils sont utilisés pour une grande variété de phénomènes physiques (accélération, concentration chimique...).

L'unité de traitement des données : les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [HW05, ASSC02b]. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pourquoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie. Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission.

L'unité de transmission de données : les composants utilisés pour réaliser la transmission sont des composants classiques. Ainsi on retrouve les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans-fil : la quantité d'énergie nécessaire à la transmission augmente avec la distance. Pour les réseaux sans-fil classiques *(LAN, GSM)* la consommation d'énergie est de l'ordre de plusieurs centaines de milliwatts, et on se repose sur une infrastructure alors que pour les réseaux de capteurs, le système de transmission consomme environ 20 mW et possède une portée de quelques dizaines de mètres. Pour augmenter ces distances tout en préservant l'énergie, le réseau utilise un routage multi-sauts.

La source d'énergie : pour des réseaux de capteurs sans fil autonomes, l'alimentation est une composante cruciale. Il y a essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant ses piles. À titre indicatif, ce sera souvent une pile AA normale d'environ $2.2 - 2.5$ Ah fonctionnant à 1.5 V [HW05].

2.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs

2.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs est généralement constitué de nombreux nœuds répartis dans une zone *(sensor field)*. Ces nœuds sont reliés à une ou plusieurs passerelles *(sink)* qui permettent l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellite ...) et la récupération des données (cf. Fig. 2.1).

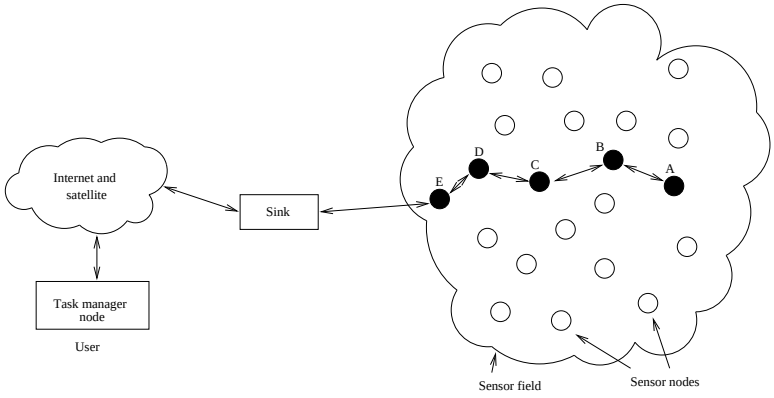


FIG. 2.1 – Architecture d'un réseau de capteurs.

2.3.2 Les différents facteurs de conception

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs comme la tolérance aux pannes, les coûts de production, la consommation d'énergie, l'environnement ou la topologie du réseau. Ces facteurs représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs.

Tolérance aux pannes : Les nœuds peuvent être sujets à des pannes dues à leur fabrication (ce sont des produits de série bon marché, il peut donc y avoir des capteurs défectueux) ou plus fréquemment à un manque d'énergie. Les interactions externes (chocs, interférences) peuvent aussi être la cause des dysfonctionnements. Afin que les pannes n'affectent pas la tâche première du réseau, il faut évaluer la capacité du réseau à fonctionner sans interruption.

Coût de fabrication : Les nœuds sont des produits fabriqués en série du fait de leur grand nombre. Il faut que le coût de fabrication de ces nœuds soit tel que le coût global du réseau ne soit pas

supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt.

Topologie du réseau : En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds-capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée. On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- *Déploiement :* Les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome.
- *Post-Déploiement - Exploitation :* Durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds ou bien à des pannes.
- *Redéploiement :* L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

Consommation d'énergie : L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par saut, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau.

2.3.3 Architecture protocolaire

La pile de protocoles utilisée par le puits *(Sink)* ainsi que par tous les nœuds-capteurs est donnée dans la Fig. 2.2. Cette pile de protocoles combine routage et gestion d'énergie et intègre les données avec les protocoles réseau. Elle communique de manière efficace (en terme d'énergie) à travers le support sans fil et favorise les efforts de coopération entre les nœuds-capteurs. La pile de protocoles comprend *une couche application*, *une couche transport*, *une couche réseau*, *une couche liaison de données*, *une couche physique*, *un plan de gestion d'énergie*, *un plan de gestion de mobilité* et *un plan de gestion des tâches*. Selon les tâches de détection, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés dans la couche application. La couche transport contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige. La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport. Comme l'environnement est sujet au bruit et que les nœuds-capteurs peuvent être mobiles, le protocole MAC doit tenir compte de la consommation d'énergie et doit être en mesure de réduire les collisions entre les nœuds voisins lors d'une diffusion par exemple. La couche

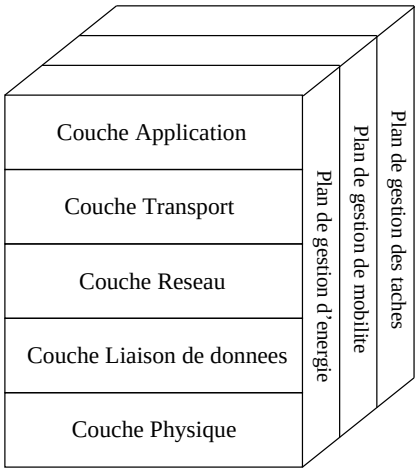


FIG. 2.2 – La pile protocolaire des réseaux de capteurs.

physique répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception.

En outre, les plans de gestion d'énergie, de mobilité et des tâches surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements, et la répartition des tâches entre les nœuds-capteurs. Ces plans aident les nœuds-capteurs à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie.

2.4 Applications des réseaux de capteurs sans fil

Plusieurs applications envisagées dans les réseaux de capteurs font toujours l'objet d'une recherche et d'un développement actifs universitaires ou industriels [Kri06]. On trouve des applications pour la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodivesité, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et la télématique, etc. Nous décrivons ici brièvement quelques applications dans certains domaines pour donner une idée de cette étendue.

Supervision de l'habitat écologique

Les études scientifiques des habitats écologiques (animaux, végétaux, micro-organismes) sont traditionnellement effectuées grâce à des activités sur le terrain par des enquêteurs. Un problème majeur dans ces études provient de ce qui est parfois appelé "l'effet de l'observateur". En effet, la présence et

les activités potentiellement intrusives des enquêteurs sur le terrain peuvent affecter le comportement des organismes dans l'habitat supervisé et ainsi fausser les résultats des observations. Des réseaux de capteurs sans fil sans surveillance promettent une nouvelle approche écologique d'observation à distance pour la surveillance de l'habitat. En outre, les réseaux de capteurs, en raison de leur grande échelle potentielle et d'une haute densité spatio-temporelle, peuvent fournir des données expérimentales d'une richesse sans précédent.

Un des pemiers déploiements expérimentals de réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance de l'habitat s'est déroulé, sur *Great Duck Island* dans le golfe du Maine [MCP+02]. Une équipe de chercheurs du laboratoire de recherche d'*Intel* à *Berkeley*, de l'Université de Californie à Berkeley, et du Collège de l'Atlantique à Bar Harbor ont déployé des nœuds-capteurs sans fil dans et autour des terriers de « L'océanite culblanc[1] », un oiseau qui vit en grandes colonies sur l'île, au cours de la saison de reproduction. Les données transmises par le réseau de capteurs ont été mise à disposition sur le web, via une station de base sur l'île reliée à un lien de communication par satellite.

Surveillance militaire et traque de cibles

Comme beaucoup d'autres technologies de l'information, les réseaux de capteurs sans fil proviennent principalement de la recherche militaire. Des réseaux de capteurs autonomes sont envisagés comme l'ingrédient essentiel dans cette lancée vers des systèmes de guerre centrés sur les réseaux. Ils peuvent être rapidement déployés et utilisés pour la surveillance des champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement, et l'identité des soldats et des véhicules, ou bien encore pour la détection des agents chimiques, biologiques et nucléaires.

Une grande partie de la croissance rapide dans la recherche et le développement des réseaux de capteurs sans fil a été apportée par des programmes financés par l'Agence américaine pour les Projets de Recherche Avancée de Défense (*DARPA* pour *Defense Advanced Research Projects Agency*), notamment grâce à un programme connu sous le nom de *"SensIT" (Sensor Information Technology)* [Sen99] de 1999 à 2002.

Supervision des structures et des phénomènes sismiques

Une autre classe d'applications pour réseaux de capteurs concerne le suivi de l'état des structures civiles. Ces structures peuvent être des bâtiments, des ponts et des routes, voire des aéronefs. À l'heure actuelle, la sûreté de ces structures est principalement apportée par le biais d'inspections manuelles

[1] L'océanite culblanc ou en anglais *Leach's storm petrel* (*Oceanodroma leucorhoa*) est un oiseau de mer de la famille des procellariidés (sous-famille des hydrobatinés).

ou visuelles ou occasionnellement par des technologies onéreuses en temps et en argent, telles que les rayons X et les ultrasons. Des techniques de détection réseau permettent d'automatiser le processus, en fournissant en temps opportun de riches informations sur un début de fissure ou d'autres dommages structuraux [XRC+04].

Les chercheurs envisagent le déploiement de ces capteurs avec une forte densité sur les structures, en les intégrant dans le matériau de construction comme le béton, ou en les mettant sur la surface. Ces réseaux de capteurs ont un potentiel pour le suivi à long terme de l'usure des structures ainsi que de leur état après des événements destructeurs, comme les tremblements de terre ou des explosions. Une vision futuriste, particulièrement pour l'utilisation des réseaux de capteurs, implique le développement de structures contrôlables, qui contiennent des actionneurs qui réagissent en temps réel aux informations du capteur pour effectuer une « Annulation-d'écho » sur les ondes sismiques pour que la structure ne soit affectée par aucune perturbation externe.

Détection en réseau dans l'industrie et le commerce

Dans la fabrication industrielle, des capteurs et des actionneurs sont utilisés pour les processus de suivi et de contrôle. Par exemple, dans une usine de traitement chimique à plusieurs étapes, il peut y avoir des capteurs placés en différents points dans le processus afin de surveiller la température, la concentration chimique, la pression, etc.

Les informations de cette surveillance en temps réel peuvent être utilisées pour diversifier les processus de contrôle, tels que l'ajustement des quantités d'un ingrédient particulier ou encore pour modifier les paramètres de chaleur. Le principal avantage de la création des réseaux de capteurs sans fil dans ces milieux est qu'ils peuvent améliorer de manière significative à la fois le coût et la souplesse inhérente à l'installation, mais encore l'entretien et la modernisation des systèmes filaires [AMS99]. Il convient de noter qu'il existe déjà plusieurs sociétés de développement et de commercialisation de ces produits à l'image des technologies standards telles que le standard IEEE 802.15.4 [IEE03], et de la collaboration industrielle telle que l'Alliance Zigbee [Zig05].

2.5 Les réseaux de capteurs *"Mostly-off"* et *"Mostly-on"*

Le comportement global de la communication dans un réseau de capteurs sans fil est axée sur l'application. Par conséquent, nous trouvons plusieurs types de réseaux en fonction du modèle de délivrance de données qu'impose l'application (continu, initié par la Station de Base ou hybride) [TAGH02]. Ce modèle influe sur l'activité radio des nœuds, ce qui fait que plusieurs types de réseaux existent, en

l'occurence les réseaux *"Mostly-off"* et les réseaux *"Mostly-on"*.

Les réseaux de capteurs *"mostly-off"* sont évoqués dans plusieurs documents notamment dans [LYH06]. C'est une catégorie de réseaux de capteurs, où les nœuds gardent leur radios éteintes pendant de très longues périodes. Par la suite, ces nœuds se réveillent pour envoyer leurs données à un collecteur. Le problème qui revient souvent dans ce type de réseau est le problème de la synchronisation entre les nœuds dû à la dérive d'horloge. Par antonymie, nous qualifierons dans ce manuscrit de *"mostly-on"* les réseaux de nœuds dont les radios sont la plupart du temps allumées.

2.6 Consommation d'énergie d'un nœud-capteur

2.6.1 Formes de dissipation d'énergie

Les nœuds-capteurs sont alimentés principalement par des batteries. Ils doivent donc fonctionner avec un bilan énergétique frugal. En outre, ils doivent le plus souvent avoir une durée de vie de l'ordre de plusieurs mois, voire de quelques années, puisque le remplacement des batteries n'est pas une option envisageable pour des réseaux avec des milliers de nœuds.

Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est extrêmement important de faire d'abord une analyse des différents facteurs provoquant la dissipation de l'énergie d'un nœud-capteur [RSPS02]. Cette dissipation d'énergie se fait de manière générale selon plusieurs modes :

- *Le MCU*[2] *:* Généralement les MCUs possèdent divers modes de fonctionnement : actif, *"idle"*, et sommeil, à des fins de gestion d'énergie. Chaque mode est caractérisé par une quantité différente de consommation d'énergie. Par exemple, le MSP430[3] consomme 3 mW en mode actif, 98 μW dans le mode *"idle"* et seulement 15 μW dans le mode sommeil. Toutefois, la transition entre les modes de fonctionnement implique un surplus d'énergie et de latence. Ainsi, les niveaux de consommation d'énergie des différents modes, les coûts de transition entre les modes mais encore le temps passé par le MCU dans chaque mode ont une incidence importante sur la consommation totale d'énergie d'un nœud-capteur.
- *La radio :* la radio opère dans quatre modes de fonctionnement : émission, réception, *"idle"*, et sommeil. Une observation importante dans le cas de la plupart des radios est que le mode *"idle"* induit une consommation d'énergie significative, presque égale à la consommation en mode réception [XHE01]. Ainsi, il est plus judicieux d'éteindre complètement la radio plutôt que de passer en mode *"idle"* quand l'on a ni à émettre ni à récevoir de données. Un autre facteur

[2] Unité du microcontrôleur ou *Micro Controller Unit*

[3] Les capteurs tmoteSky présenté dans la suite du manuscrit sont équipés de ce microcontrôleur.

déterminant est que, le passage de la radio d'un mode à un autre engendre une dissipation d'énergie importante due à l'activité des circuits électroniques. Par exemple, quand la radio passe du mode sommeil au mode émission pour envoyer un paquet, une importante quantité d'énergie est consommée pour le démarrage de l'émetteur lui-même [RSPS02]. Un autre point important est que les données des constructeurs sous-estiment assez rigulièrement ces différentes consommations comme ont pu le montrer les auteurs de [PB09], en particulier concernant la consommation dans le mode *"idle"*.

- *Le détecteur ou le capteur proprement dit :* il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par le module de détection, notamment l'échantillonnage et la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le conditionnement des signaux et la conversion analogique-numérique. Étant donné la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée. En revanche, les capteurs passifs (température, sismiques, ...) consomment le plus souvent peu d'énergie par rapport aux autres composants du nœud-capteur. Notons, les capteurs actifs tels que les sonars, les capteurs d'images, etc. peuvent consommer beaucoup d'énergie.

En outre, il existe d'autres formes de dissipation d'énergie telles que les lectures et les écritures mémoire. Un autre aspect non négligeable est le phénomène d'auto-décharge de la batterie. En effet, cette dernière se décharge d'elle même et perd de sa capacité au fil du temps.

Il est difficile d'apporter ici une étude quantitative et comparative précise de la consommation de chaque composant d'un nœud-capteur en raison du grand nombre de plates-formes commerciales existantes. Cependant, des expérimentations ont montré que c'est la transmission de données qui est la plus consommatrice en énergie [RSPS02]. Le coût d'une transmission d'un bit d'information est approximativement le même que le coût nécessaire au calcul d'un millier d'opérations [PK00]. La consommation du module de détection dépend du type spécifique du nœud-capteur.

2.6.2 Sources de surconsommation d'énergie

Nous appelons surconsommation d'énergie toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud-capteur. Les sources de cette surconsommation sont nombreuses, elles peuvent être engendrées lors de la détection lorsque celle-ci est mal gérée (par exemple par une fréquence d'échantillonage est mal contrôlée) [AAG+07].

La surconsommation concerne également la partie communication. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Certains de ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie et ont été recensés dans [YHE04, ABJ08, HW05] :

- ***Les collisions :*** elles sont la première source de perte d'énergie. Quand deux trames sont émises en même temps et se heurtent, elles deviennent inexploitables et doivent être abandonnées. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. Tous les protocoles MAC essayent à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions concernent plutôt les protocoles MAC avec contention.
- ***L'écoute à vide (idle listening) :*** un nœud dans l'état *"idle"* est prêt à recevoir un paquet[4], mais il n'est pas actuellement en train de recevoir quoi que ce soit. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode *"idle"*. Eteindre la radio est une solution, mais le coût de la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester « raisonnable ».
- ***L'écoute abusive (overhearing) :*** cette situation se présente quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Le coût de l'écoute abusive peut être un facteur dominant de la perte d'énergie quand la charge de trafic est élevée et la densité des nœuds grande, particulièrement dans les réseaux *"mostly-on"*.
- ***L'overmitting :*** un nœud envoie des données et le nœud destinataire n'est pas prêt à les recevoir.
- ***L'overhead des paquets de contrôle :*** l'envoi, la réception, et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie. Comme les paquets de contrôle ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

2.6.3 Mécanismes de conservation de l'énergie

Comme nous l'avons souligné dans le paragraphe 2.6.1, c'est la transmission de données qui se révèle extrêmement consommatrice par rapport aux tâches du nœud-capteur. Cette caractéristique conjuguée à l'objectif de maximisation de la durée de vie du réseau a suscité de nombreux travaux de recherche. Avant de citer ces travaux dans le chapitre suivant, nous introduisons dans ce paragraphe certains mécanismes de base :

Mode d'économie d'énergie : ce mode est possible quelle que soit la couche MAC adoptée. Cela consiste à éteindre le module de communication dès que possible. Par exemple, des protocoles MAC fondés sur la méthode *TDMA (Time Division Multiple Access)* offrent une solution implicite

[4]Dans le présent manuscrit, on appellera communément « paquet » les PDU de niveau MAC et l'on réservera le nom de « trame » aux PDU de la couche physique.

puisqu'un nœud n'échange des messages que dans les intervalles de temps qui lui sont attribués. Il peut alors garder sa radio éteinte durant les autres slots. Comme nous l'avons souligné précédemment, il faut toutefois veiller à ce que le gain d'énergie obtenu en mettant en veille le module radio ne soit pas inférieur au surcoût engendré par le redémarrage de ce module.

Traitement local : L'idée de cette technique est que la source peut se censurer. Ainsi une programmation événementielle semble bien adaptée aux réseaux de capteurs. Seuls les changements significatifs de l'environnement devrait provoquer un envoi de paquets le réseau. Dans le même état d'esprit, une grande collaboration est attendue entre les capteurs d'une même région en raison de leur forte densité et dans la mesure où les observations ne varient presque pas entre des voisins très proches. Ainsi les données pourront être confrontées localement et agrégées au sein d'un seul et unique message. Cette stratégie de traitement local permet de réduire sensiblement le trafic.

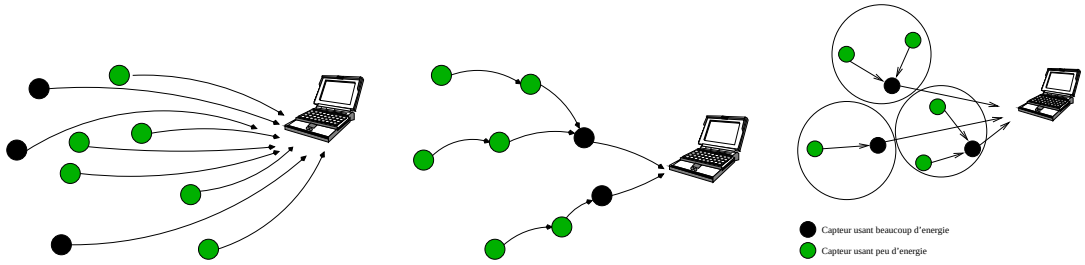
Organisation des échanges : ce procédé revient à limiter les problèmes de retransmission dus aux collisions. La solution extrême consiste à utiliser la technique d'accès au medium TDMA. Les collisions sont ainsi fortement réduites. Cette solution présente l'inconvénient d'être peu flexible et de demander une synchronisation fine des capteurs. Des solutions intermédiaires ont vu le jour, par exemple S-MAC *(Sensor MAC)* [YHE04] qui est une méthode d'accès au canal de type CSMA-CA avec le mécanisme RTS/CTS *(Request to Send, Clear to Send)* qui permet d'éviter les collisions et le problème de la station cachée. La principale innovation, apportée par ce protocole, est d'avoir un mécanisme de mise en veille distribué sur chaque nœud du réseau dans le but de réduire la consommation d'énergie. La principale difficulté de S-MAC est également de synchroniser les nœuds entre eux pour que la communication soit toujours possible.

Limitation des accusés de réception : l'acquittement systématique est mal adapté à des réseaux denses : il provoque une surcharge du réseau et donc des collisions et des interférences avec les données utiles échangées dans le réseau. Les acquittements par *"piggy-backing"* seront à privilégier.

Répartition de la consommation d'énergie : la formation de *"clusters"*[5] permet d'envisager des réseaux comportant un très grand nombre de capteurs. Elle favorise une meilleure répartition de la consommation d'énergie. En effet, dans le cas d'une transmission directe vers l'observateur 2.3(a), les capteurs éloignés vont plus rapidement manquer d'énergie et les autres nœuds peuvent être sujets

[5] Terme anglais pour désigner un groupe de nœuds.

au phénomène d'*overhearing* dans le cas des réseaux *"Mostly-On"*. Au contraire, dans le cas d'une



(a) (b) (c)

FIG. 2.3 – À gauche - Transmissions directes. Au centre - Transmission saut par saut. À droite - Hiérarchisation en *clusters*.

transmission par saut 2.3(b), les nœuds proches de l'observateur vont être vite en rupture de batterie car ils seront plus sollicités pour relayer les messages des autres. La solution consiste à hiérarchiser les échanges en divisant la zone d'observation en *clusters* 2.3(c). Un *"clusterhead"* est élu pour chaque *cluster*. Il s'occupe de récupérer les informations auprès des capteurs de son *cluster* et de les transmettre directement à l'observateur. En changeant régulièrement de *clusterhead*, on obtient un réseau dans lequel aucun capteur n'est prédisposé à arriver en rupture de batterie avant les autres. Mettre en place des *clusters* va également permettre de cloisonner le réseau et ceci dans l'objectif de réduire les interférences. On améliore ainsi la qualité du lien radio et par conséquent, on limite les retransmissions liées aux reprises sur erreur. L'exemple phare d'une solution avec des *clusters* est le protocole *LEACH* [HCB00].

Par ailleurs, il existe dans la littérature d'autres mécanismes de conservation d'énergie, telles les techniques de compression, d'agrégation et de fusion de données, d'autre techniques de routage, etc. Nous les retrouverons dans le chapitre suivant.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base et fédéré quelques concepts nécessaires à la compréhension de nos problématiques dans la suite de ce manuscrit.

Cela fait des années que les réseaux de capteurs suscitent un engouement important dans la recherche. Nous avons remarqué à travers nos lectures que *« minimiser la consommation d'énergie d'un nœud-capteur »* est « le cheval de bataille » de toutes les solutions et protocoles proposés. En

effet, lorsque ce n'est pas l'objectif principal, alors c'est sûrement un critère de performance capital. Nous avons évoqué les formes de dissipation et les sources de surconsommation d'énergie par un nœud-capteur.

Dans la prochaine partie nous conjuguerons cela avec la notion de la durée de vie du réseau et nous dresserons un panorama des techniques de conservation d'énergie proposées dans la littérature afin de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

Chapitre 3

Techniques de conservation d'énergie existantes

Sommaire

3.1 Introduction **19**
3.2 Notion de durée de vie d'un réseau **20**
3.3 Conservation d'énergie **22**
3.4 Techniques du *Duty-cycling* **23**
3.4.1 Protocoles *Sleep/Wakeup* 23
3.4.2 Protocoles du niveau MAC 24
3.5 Techniques orientées données **28**
3.5.1 Réduction des données 28
3.5.2 Acquisition de données efficace en énergie 29
3.6 Techniques de mobilité **30**
3.7 Conclusions **32**

3.1 Introduction

La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Toutefois, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau [DD09]. La durée de vie est également considérée comme un paramètre fondamental dans un contexte de disponibilité et de sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil [KM08].

Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi

majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

Suite à l'introduction du chapitre précédent sur les formes de dissipation et de surconsommation d'énergie des nœuds-capteurs, nous présentons dans cette partie un panorama de techniques et de mécanismes de conservation d'énergie.

3.2 Notion de durée de vie d'un réseau

Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est « en vie », mais pas au delà. La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années.

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. Selon la discussion de *Akyildiz et al.* dans [ASSC02b], la quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud-capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données.

Il existe différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs (fondées sur la fonctionnalité désirée). Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier nœud meurt. Elle peut également être définie par le temps jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela peut avoir comme conséquence la non-couverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. Les définitions possibles et proposées dans la littérature sont les suivantes :

1. La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [HW05, CT00, GK05, MRK+05, WSC05] ;
2. La durée jusqu'à ce que le premier *clusterhead* épuise toute son énergie [CCMN02, SH05] ;
3. La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction β de nœuds survivants dans le réseau [CE04, DHHV05, HC06] ;
4. Demi-vie du réseau : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner [HW05] ;
5. La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie [TG02] ;

6. La durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus). Cela peut correspondre aussi à la mort du premier nœud (si celui-ci tient une position centrale) ou plus tard si la topologie du réseau est plus robuste [HW05] ;
7. k-couverture : la durée pendant laquelle la zone d'intérêt est couverte par au moins k nœuds [MQW05] ;
8. 100%-couverture
   - (a) La durée pendant laquelle chaque cible est couverte par au moins un nœud [CTLW05, LWY+05] ;
   - (b) La durée pendant laquelle l'ensemble de la zone est couverte par au moins un nœud [BC01, BC02] ;
9. α-couverture
   - (a) La durée cumulée, au bout de laquelle au moins une portion α de la région est couverte par au moins un nœud [ZH05a, ZH05b, ZH05c] ;
   - (b) La durée pendant laquelle la couverture tombe en-dessous d'un seuil prédéfini α [WGLX05] ;
   - (c) La durée de fonctionnement continu du système avant que la couverture ou la proportion de paquets reçus (*PDR* pour *Packet Delivery Ratio*) tombent en-dessous d'un seuil prédéfini [XWZ+05, CGVC06] ;
10. La durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possèdent un chemin vers la Station de Base [CGVC06].
11. L'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une k-couverture est au moins α [MQW05] ;
12. La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture [CW04, KRSP05, SS05] ;
13. La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements [TG02] ;
14. La durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application [BS02, KAL05, TAGH02].

Finalement, nous constatons bien que plusieurs définitions convergent puisque certaines d'entre elles ne sont que des relaxations des autres et la majorité suggère que la durée de vie du réseau dépend de la consommation d'énergie de ses nœuds. Toutefois, il peut s'avérer judicieux d'introduire une métrique pour affiner ou choisir une de ces définitions telle que la fiabilité, la couverture, la robustesse, etc. Ce que l'on peut également constater c'est que la définition même de la durée de vie va dépendre de l'application dévolue au réseau de capteurs.

L'emplacement des nœuds défaillants est également important. Si la proportion de nœuds qui ont manqué d'énergie est située dans une certaine partie critique du réseau, par exemple, reliant le nœud central (Station de Base) et le reste du réseau, cela peut avoir comme conséquence le dysfonctionnement précoce du réseau entier. [CZ05, LM07].

Il convient de noter que la simulation de la durée de vie du réseau peut être un problème statistique difficile. De toute évidence, plus ces durées sont longues, meilleur est le fonctionnement du réseau. De manière plus générale, il est possible de chercher à estimer le complémentaire de la fonction de répartition des durées de vie des nœuds (avec la probabilité qu'un nœud survive un temps donné), ou la survie relative d'un réseau (à quel moment tel pourcentage de nœuds est encore opérationnel). Notons toutefois que des corrélations vont s'instaurer entre les consommations des différents nœuds, ces corrélations pouvant être positives et liées à une densité importante d'événements dans une partie de la zone de surveillance ou du phénomène d'overhearing ou bien négatives en raison du routage

Toutes ces métriques peuvent bien sûr être évaluées avec un ensemble d'hypothèses sur les caractéristiques d'un nœud donné en terme de consommation d'énergie, sur la « charge » courante que le réseau est appelé à traiter (par exemple, où et quand les événements se produisent) et aussi sur le comportement du canal radio.

3.3 Conservation d'énergie

Des mesures expérimentales ont montré que, généralement, c'est la transmission des données qui est la plus consommatrice en énergie, et de façon significative, les calculs, eux, consomment très peu [RSPS02]. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par le module de traitement et, par dessus tout, le module de communication.

Dans d'autres cas, l'énergie dépensée pour la détection peut être comparable, ou supérieure à celle nécessaire à la transmission de données. En général, les techniques d'économie d'énergie se concentrent sur deux parties : la partie réseau (i.e., la gestion d'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception de protocoles réseau), et la partie détection (i.e., des techniques sont utilisées pour réduire le nombre ou la fréquence de l'échantillonnage coûteux en énergie).

La durée de vie d'un réseau de capteurs peut être prolongée par l'application conjointe de différentes techniques [ACFP09]. Par exemple, les protocoles efficaces en énergie visent à réduire au minimum la consommation d'énergie pendant l'activité du réseau. Toutefois, une quantité considérable d'énergie est consommée par les composants d'un nœud (CPU, radio, etc), même s'ils sont inactifs. Un plan de

gestion dédié à l'énergie peut alors être utilisé pour éteindre temporairement les composants du nœud lorsqu'ils ne sont pas sollicités.

3.4 Techniques du *Duty-cycling*

Cette technique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille *(low-power)* à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé *Duty-cycling*. Un *Duty-cycle* est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs.

Comme les nœuds-capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de *Duty-cycling*. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle (i.e., ils dorment la plupart du temps).

3.4.1 Protocoles *Sleep/Wakeup*

Comme mentionné précédemment, un régime *sleep/wakeup* peut être défini pour un composant donné (i.e. le module Radio) du nœud-capteur. On peut relever les principaux plans *sleep/wakeup* implantés sous forme de protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (i.e. au niveau de la couche réseau ou de la couche application). Dans le document [Arm05], les protocoles *sleep/wakeup* sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones.

- Les protocoles à la demande utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. À cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à "haut" débit mais à plus forte consommation pour la communication de données). Le protocole STEM *(Sparse Topology and Energy Management)* [STS02], par exemple, utilise deux

radios ;

- Une autre solution consiste à utiliser une approche de rendez-vous programmés. L'idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous ;
- Enfin, un protocole *sleep/wakeup* asynchrone peut être utilisé. Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime *sleep/wakeup*, aucun échange d'informations n'est alors nécessaire entre les nœuds. Quelques régimes *sleep/wakeup* asynchronnes sont proposés dans [ZHS03].

3.4.2 Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont été proposés, et de nombreux états de l'art et introductions aux protocoles MAC sont disponibles dans la littérature (par exemple, [DEA06, Lan08, YH04]). Nous nous concentrons principalement sur les questions de gestion d'énergie plutôt que sur les méthodes d'accès au canal. La plupart d'entre eux mettent en œuvre un régime avec un faible *duty-cycle* pour gérer la consommation d'énergie. Nous avons recensés les protocoles MAC les plus communs en les classant en trois catégories : les protocoles fondés sur TDMA, les protocoles utilisant la contention et les protocoles hybrides.

3.4.2.1 Protocoles MAC reposant sur TDMA

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA [AYY02, Haa00, HCB00, ROGLA03] le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de *slots* de temps. À chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un certain algorithme d'ordonnancement. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de/vers d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des *clusters* avec un *cluster*head qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son *cluster* (par exemple, Bluetooth [Haa00], LEACH [HCB00], et Energy-aware TDMA-based MAC [AYY02]).

Exemple : un des protocoles TDMA important et efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil est TRAMA [ROGLA03]. TRAMA divise le temps en deux parties, une période avec un accès aléatoire et une période avec un accès ordonnancé. La période d'accès aléatoire est consacrée à la réservation des slots et l'accès au canal est fondé sur la contention. *A contrario*, la période d'accès ordonnancée est constituée par un certain nombre de slots de temps attribués à un nœud précis.

L'algorithme de réservation des slots est le suivant. Tout d'abord, les nœuds cherchent des informations sur un voisinage à deux sauts, qui sont nécessaires pour établir un ordonnancement sans collisions. Ensuite, les nœuds commencent une procédure d'élection afin d'associer chaque slot à un seul nœud. Chaque nœud aura une priorité pour être le propriétaire d'un slot. Cette priorité est calculée avec une fonction de hachage de l'identifiant du nœud et du numéro du slot. Le nœud avec la plus grande priorité devient le propriétaire du slot. Enfin, les nœuds envoient un paquet de synchronisation contenant la liste des voisins destinataires pour les transmissions suivantes. Par conséquent, les nœuds peuvent se mettre d'accord sur les slots où ils doivent être éveillés. Les slots inutilisés peuvent être annoncés par leurs propriétaires pour être réutilisés par d'autres.

Les protocoles TDMA sont par nature efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument leur radio que lors de leurs propres slots et s'endorment le reste du temps. Toutefois, dans la pratique, les protocoles TDMA ont plusieurs inconvénients qui compensent les avantages en terme d'économie d'énergie [RWA+08]. Premièrement, les algorithmes classiques de réservation de slots ont tendance à être complexes, peu flexibles et présentent des problèmes lors du passage à l'échelle. En effet, dans un véritable réseau de capteurs, les changements de topologie sont fréquents (conditions variables du canal, défaillances de nœuds, ...) et la répartition des slots peut être problématique donc dans de nombreux cas ; une approche centralisée peut être adoptée (LEACH [HCB00]). Deuxièmement, ils requièrent une synchronisation très fine et ils sont très sensibles aux interférences [ABC+05]. En outre, les protocoles TDMA fonctionnent moins bien que les protocoles avec contention lors d'un trafic faible. C'est pour toutes ces raisons que les protocoles MAC TDMA ne sont pas très fréquemment utilisés dans les réseaux de capteurs.

3.4.2.2 Protocoles MAC avec contention

Les protocoles avec contention sont les plus populaires et représentent la majorité des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils assurent le *duty-cycle* par une intégration étroite des fonctionnalités d'accès au canal avec un régime *sleep/wakeup*. La seule différence est que, dans ce cas, l'algorithme *sleep/wakeup* n'est pas un protocole indépendant.

Exemples : un des plus populaires est B-MAC (MAC Berkeley) [PHC04], avec une faible complexité et une faible consommation induite par le système d'exploitation TinyOS [TOS01]. L'objectif de B-MAC est de fournir quelques fonctionnalités de base et un mécanisme efficace en énergie pour l'accès au canal. Il met d'abord en œuvre les caractéristiques de base du contrôle d'accès au canal : un algorithme de backoff, une estimation efficace du canal et des acquittements optionnels. Deuxièmement, pour atteindre un faible *duty-cycle*, B-MAC utilise un plan *sleep/wakeup* asynchrone fondé sur l'écoute périodique

appelée *Low Power Listening* (LPL). Les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier l'activité sur le canal. La période entre deux réveils est nommée intervalle de vérification. Après le réveil, les nœuds restent actifs pour un temps de réveil, afin de détecter d'éventuelles transmissions. Contrairement au temps de réveil qui est fixé, l'intervalle de vérification peut être spécifié par l'application. Les paquets B-MAC sont constitués d'un long préambule et d'une charge utile. La durée du préambule est au moins égale à l'intervalle de vérification, afin que chaque nœud puisse toujours détecter une éventuelle transmission au cours de son intervalle de vérification. Cette approche ne nécessite pas que les nœuds soient synchronisés. En fait, quand un nœud détecte l'activité sur le canal, il reste actif et reçoit le préambule en premier puis la charge utile.

Un autre protocole MAC multi-sauts célèbre dans les réseaux de capteurs est *S-MAC (Sensor-MAC)* [YHE04]. Il adopte un régime de communication avec planification par rendez-vous. Les nœuds échangent des paquets de synchronisation afin de coordonner leurs périodes *sleep/wakeup*. Chaque nœud peut établir son propre plan ou suivre le plan d'un voisin au moyen d'un algorithme distribué. Les nœuds utilisant le même plan forment un *cluster* virtuel. Un nœud peut éventuellement suivre deux plans s'ils ne se superposent pas, de sorte qu'il puisse faire un pont de communication entre différents *clusters* virtuels. Le temps d'accès au canal est divisé en deux parties. Dans la période d'écoute, les nœuds échangent des paquets de synchronisation et des paquets de contrôle pour éviter des collisions. Le transfert de données aura lieu dans le reste de la période. Les nœuds source et destination sont éveillés et communiquent entre eux. Les nœuds qui ne sont pas concernés par cette communication peuvent dormir jusqu'à la prochaine période d'écoute.

Pour éviter les latences dans des environnements multi-sauts, S-MAC utilise un plan d'écoute adaptatif. Les paramètres du protocole S-MAC, i.e. les périodes d'écoute et de sommeil, sont constantes et ne peuvent pas être modifiées après le déploiement. Les auteurs de [vL03] proposent alors une version améliorée de S-MAC appelée *Timeout MAC (T-MAC)* et spécialement conçue pour une charge de trafic variable. Bien que les protocoles MAC fondée sur le *duty-cycle* soient efficaces en énergie, ils souffrent de la latence du sommeil, i.e., un nœud doit attendre que le récepteur se réveille avant qu'il puisse acheminer un paquet. Cette latence augmente avec le nombre de sauts. En outre, la diffusion de données à partir d'un nœud vers le puits peut connaître un problème d'interruption. En fait, la sensibilité de la radio limite la portée de l'*overhearing*. Les nœuds en dehors de la portée de l'émetteur ne peuvent donc pas entendre la transmission en cours et se rendorment. C'est pourquoi, dans S-MAC et T-MAC la diffusion de données est limitée à quelques sauts.

IEEE 802.15.4 [IEE03] est un standard à faible débit et à faible puissance pour les réseaux personnels (*PAN* pour *Personal Area Networks*). Un *PAN* est formé d'un *PAN coordinator* qui gère l'ensemble

du réseau et, éventuellement, d'un ou plusieurs coordinateurs qui gèrent les sous-ensembles de nœuds du réseau. D'autres nœuds (ordinaires) doivent s'associer à un coordinateur afin de communiquer. Les topologies de réseau possibles sont l'étoile (saut unique), le *cluster*-tree et le mesh (multi-sauts). Le standard IEEE 802.15.4 prend en charge deux méthodes d'accès aux différents canaux : un mode beacon-enabled et un mode non-beacon enabled. Le mode beacon enabled fournit un mécanisme de gestion d'énergie sur la base du *duty-cycle*. Concrètement, il utilise une structure de supertrame qui est délimitée par des balises. D'autres trames de synchronisation sont générées périodiquement par les nœuds coordinateurs. Chaque supertrame consiste en une période active et une période inactive. Dans la période d'activité les dispositifs communiquent avec le coordonnateur auquel ils sont associés. La période active peut être divisée en une période d'accès avec contention (*CAP* pour *Contention Access Period*) et une période sans contention (CFP). Au cours de la CAP un algorithme CSMA/CA discrétisé est utilisé pour accéder au canal, tandis que, durant la CFP, un certain nombre de slots garantis (GTS) peuvent être attribués à chaque nœud. Au cours de la période inactive les dispositifs entrent en mode faible puissance pour économiser l'énergie. Dans le mode non-beacon enabled, il n'y a pas de structure en supertrame, i.e. les nœuds sont toujours à l'état actif et utilisent l'algorithme Unslotted CSMA/CA pour l'accès au canal et la transmission de données. Dans ce cas, la conservation d'énergie a lieu au niveau des couches supérieures.

Les protocoles fondés sur la contention sont robustes et garantissent le passage à l'échelle. En outre, ils ont généralement un délai plus faible que ceux reposant sur TDMA et ils peuvent facilement s'adapter aux conditions de trafic. Malheureusement, leur dissipation d'énergie est plus élevée que celle des protocoles TDMA à cause de la contention et des collisions. Des mécanismes *Duty-cycle* peuvent contribuer à réduire la surconsommation d'énergie, mais ils doivent être conçus avec soin pour être flexibles et à faible latence.

3.4.2.3 Protocoles MAC hybrides

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (changement du comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. Concernant les réseaux de capteurs sans fil, Z-MAC [RWA+08] est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec un de ses voisins à un saut n'interfère pas avec les transmission

de ses voisins à deux sauts.

Z-MAC permet à chaque nœud de maintenir son propre ordonnancement qui dépend du nombre de voisins et évite tout conflit avec ses voisins de contention. Chaque nœud a des informations sur les slots de tous ses voisins à deux sauts et tout le monde se synchronise sur un slot de référence. Après cette phase d'initialisation, les nœuds sont prêts pour l'accès au canal. Les nœuds peuvent être soit en mode faible niveau de contention (*LCL* pour *Low Contention Level*), soit en mode haut niveau de contention (*HCL* pour *High Contention Level*). Un nœud persiste dans le mode *LCL* sauf s'il a reçu une notification (*ECN* pour *Explicit Contention Notification*). Dans le mode *HCL*, seuls les propriétaires du slot et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à concourir pour l'accès au canal. En *LCL* (à la fois les propriétaires et les non-propriétaires) peuvent concourir pour transmettre dans n'importe lequel des slots. En revanche les propriétaires ont une priorité sur les autres. De cette façon, Z-MAC peut atteindre un niveau élevé d'utilisation du canal, même en faible contention, car un nœud peut transmettre dès que le canal est disponible.

Les protocoles hybrides tentent de combiner les point forts des protocoles MAC fondés sur TDMA et ceux avec contention tout en compensant leurs faiblesses. Toutefois, ces techniques semblent être complexes pour être réalisables dans un déploiement d'un grand nombre de nœuds.

3.5 Techniques orientées données

Généralement, les plans *Duty-cycling* ne tiennent pas compte des données prélevées par les nœuds. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. En fait, la détection (ou prélèvement de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- Des échantillons inutiles : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle [VAA04], il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la Station de Base. Un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile. En effet, même si le coût de l'échantillonnage est négligeable, cela induit aussi des communications tout le long du chemin qu'emprunte le message.
- La consommation électrique du module de détection : réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection pour l'application.

3.5.1 Réduction des données

Réduire les données en terme de volume ou de nombre de paquets, dans le réseaux peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmis les méthodes de réductions de données, nous trouvons le *In-network processing* qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiares entre la source et le *Sink*. Ainsi, la quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers le *Sink*. Une agrégation de données appropriée est spécifique à l'application. Un état de l'art sur les techniques *In-network processing* est présenté dans le document [FRWZ07].

La compressions de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce régime implique l'encodage d'informations au niveau des nœuds qui engendrent des données, et le décodage au niveau du *Sink*. Il existe différentes méthodes de compressions de données citées dans [TR04].

3.5.2 Acquisition de données efficace en énergie

De nombreuses applications émergantes ont d'applications a de réelles contraintes dues à la détection. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse générale selon laquelle la détection n'est pas significative d'un point de vue consommation d'énergie. En fait, la consommation d'énergie du module de détection peut, non seulement être significative, mais encore supérieure à la consommation d'énergie de la radio ou même plus grande que la consommation d'énergie du reste du nœud-capteur [AAG+07]. Cela peut être dû à différents facteurs [RGS06].

- *Transducteur gourmand en énergie :* Certains capteurs ont intrinsèquement besoin d'une forte puissance pour s'acquitter de leur tâche d'échantillonnage. Par exemple, des capteurs d'images CMOS, voire des capteurs multimédias [AMC07] ont généralement besoin de beaucoup d'énergie. Les capteurs chimiques ou biologiques peuvent aussi être gourmands en énergie.
- Convertisseurs A/D gourmands : des capteurs tels que les transducteurs acoustiques et sismiques [WALW+06] nécessitent généralement des convertisseurs A/D à haut débit et à grande résolution. La consommation d'électricité des convertisseurs représente la part la plus importante de la consommation d'énergie du sous-système de détection.
- Capteurs actifs : Une autre classe de capteurs peut obtenir des données du phénomène perçu par l'utilisation de transducteurs actifs (par exemple, sonar, radar ou laser). Dans ce cas, les capteurs doivent envoyer un signal de sondage afin d'obtenir des informations sur la grandeur observée, comme dans [DE06].
- Temps d'acquisition long : Le temps d'acquisition peut être de l'ordre de plusieurs centaines

de millisecondes, voire de quelques secondes. Par conséquent, l'énergie consommée par le sous-système de détection peut être élevé, même si la consommation d'énergie du détecteur reste modérée.

Dans ce cas, réduire les communications peut s'avérer insuffisant, mais les stratégies de conservation d'énergie doivent réellement réduire le nombre d'acquisitions (échantillons de données). Il faudrait également préciser que les techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ne visent pas exclusivement à réduire la consommation d'énergie du module de détection. En réduisant les données prélevées par des nœuds sources, elles diminuent aussi le nombre de communications. En fait, beaucoup de techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ont été conçues pour réduire au minimum l'énergie consommée par la radio, en supposant que la consommation de la radio est négligeable.

La classification des approches d'acquisition de données efficaces en énergie présentée dans [RGS06] est comme suit :

- Comme les échantillons mesurés peuvent être corrélés, les techniques d'*échantillonnage adaptatif* exploitent de telles similitudes pour réduire la quantité de données à acquérir par le transducteur. Par exemple, les données intéressantes peuvent changer lentement en fonction du temps. Dans ce cas, des corrélations temporelles peuvent être exploitées pour réduire le nombre d'acquisitions. Une approche semblable peut être appliquée lorsque le phénomène étudié ne change pas brusquement entre les régions couvertes par des nœuds voisins. L'énergie due au prélèvement (et à la communication) peut être alors réduite en profitant des corrélations spatiales entre les données prélevées. Clairement, des corrélations temporelles et spatiales peuvent être conjointement exploitées pour réduire sensiblement la quantité de données à acquérir.
- L'approche d'*échantillonnage hiérarchique* suppose que les nœuds sont équipés de sondes (ou détecteurs) de différents types. Alors que chaque sonde est caractérisée par une résolution donnée et sa consommation d'énergie associée, cette technique choisit dynamiquement la classe à activer, afin d'obtenir un compromis entre la précision et l'économie d'énergie.
- Enfin, l'échantillonnage actif fondé sur un modèle adopte une approche semblable à la prévision de données. Un modèle du phénomène mesuré est établi lors des prélèvements de données, de telle sorte que les valeurs futures puissent être prévues avec une certaine précision. Cette approche exploite le modèle obtenu pour réduire le nombre d'échantillons de données, et également la quantité de données à transmettre à la Station de Base bien que ce ne soit pas leur objectif principal.

3.6 Techniques de mobilité

Dans certains cas où les nœuds sont mobiles, la mobilité peut être utilisée comme outil pour réduire la consommation d'énergie (au-delà du duty-cycling et des techniques orientées données). Dans un réseau de capteurs statiques, les paquets provenant des nœuds suivent des chemins multi-sauts vers la station de base. Ainsi, certains chemins peuvent être chargés (sollicités plus que d'autres), et les nœuds proches de la Station de Base relayent plus de paquets [BBD+09] et sont plus sujets à l'épuisement prématuré de leurs batteries *(funneling effet)* [JP07]. Si certains nœuds (éventuellement, la station de base) sont mobiles, le trafic peut être modifié si les nœuds mobiles sont chargés de collecter des données directement à partir de nœuds statiques.

Les nœuds ordinaires attendent le passage d'un dispositif mobile pour lui envoyer leurs messages de telle sorte que la communication ait lieu à proximité (directement ou au plus avec un nombre limité de sauts). Par conséquent, les nœuds ordinaires peuvent économiser de l'énergie parce que la longueur du chemin, la contention et les overheads de diffusion sont ainsi réduits. En outre, le dispositif mobile peut visiter le réseau afin de répartir uniformément la consommation d'énergie due à la communication. Lorsque le coût de la mobilité des nœuds de capteurs est prohibitif, l'approche classique consiste à attacher un capteur à des entités qui seront en itinérance dans le champ de détection, comme des autobus ou des animaux.

Les stratégies reposant sur la mobilité peuvent être classées en deux ensembles : les stratégies avec un Sink mobile et les stratégies avec des relais mobiles, selon le type de l'entité mobile. Il est important de souligner ici que, lorsque nous examinons des systèmes mobiles, un problème important est le type de contrôle de la mobilité des nœuds qu'intègre la conception du réseau, ceci est détaillé dans [ACPP08]. Les nœuds mobiles peuvent être divisés en deux catégories : ils peuvent être spécifiquement conçus comme partie de l'infrastructure du réseau, ou faire partie de l'environnement.

Quand ils font partie de l'infrastructure, leur mobilité peut être entièrement contrôlée dans la mesure où ils sont, généralement, robotisés. Lorsque les nœuds mobiles font partie de l'environnement, ils pourraient ne pas être contrôlables. S'ils suivent un horaire strict, ils ont une mobilité complètement prévisible (par exemple, une navette pour les transports publics [CSA03]). Sinon, ils peuvent avoir un comportement aléatoire de sorte qu'aucune hypothèse ne puisse être faite sur leur mobilité.

Enfin, ils peuvent suivre un schéma de mobilité, qui n'est ni prévisible, ni totalement aléatoire. Par exemple, c'est le cas d'un bus se déplaçant dans une ville, dont la vitesse est soumise à d'importantes variations en raison des conditions de circulation. Dans un tel cas, les schémas de mobilité peuvent être tirés en se fondant sur des observations et des estimations d'une certaine précision.

3.7 Conclusions

La durée de vie d'un réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière, quant à elle, dépend éssentiellement de la consommation d'énergie du nœud. Nous avons présenté dans ce chapitre quelques approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le premier axe des techniques de conservation d'énergie vise à réduire le *duty-cycle* des nœuds. Cela se traduit par la réduction de la durée de l'activité radio afin d'éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont vu le jour soit sous forme de protocoles MAC à faible *duty-cycle* ou bien sous forme de protocoles indépendants de niveau supérieur fondés sur des ordonnancements *sleep/wakeup*.

Le second axe s'intéresse à l'acquisition des données. En effet, un point intéressant est que plusieurs solutions protocolaires proposées dans la littérature supposent que la consommation d'énergie de la radio est plus élevée que celle due à l'échantillonnage ou au traitement de données. En revanche, de nombreuses applications réelles ont montré que la consommation d'énergie du détecteur est comparable, voire supérieure à la consommation nécessaire à la radio. En outre, l'échantillonnage peut requérir beaucoup de temps (comparé à la durée nécessaire pour les communications) ce qui se traduit par une consommation d'énergie très élevée. Certains travaux de recherche laissent à penser que la conservation d'énergie centrée sur l'acquisition de données n'a pas encore été pleinement analysée. Cela ouvre la voie au développement de techniques pratiques pour réduire la consommation d'énergie des capteurs.

Dans le dernier axe, nous avons évoqué les méthodes centrées sur la mobilité des nœuds relais ou bien des puits de données. Il existe un intérêt croissant pour ce type d'approches car si certaines applications pratiques envisagent des déploiements moins denses, alors pour des raisons d'efficacité et de robustesse, les protocoles de communication peuvent exploiter de façon appropriée la mobilité des nœuds collecteurs.

Il existe bien évidemment beaucoup d'autres techniques de conservation d'énergie. Par exemple, les paradigmes émanants de l'auto-organisation des systèmes, les mécanismes cross-layers et d'autres protocoles indépendants de niveau réseau ou de niveau application. La prochaine phase de notre travail consiste justement à présenter une solution protocolaire de niveau applicatif pour le suivi de la chaîne du froid. Dans cette solution nous allons jumeler de nombreux mécanismes que nous avons cité dans cet état de l'art.

Chapitre 4

Solution protocolaire pour le suivi de la chaîne du froid

Sommaire

4.1 Introduction 33
4.2 Problématique et scénario retenu 34
4.3 Analyse du scénario 35
4.4 Solutions 36
4.4.1 Réveils groupés 37
4.4.2 Création d'un anneau virtuel 37
4.5 Évaluation de performances 46
4.5.1 Modèle analytique 47
4.5.2 Environnement de simulation 48
4.5.3 Amélioration des performances 55
4.6 Implantation et tests 61
4.7 Conclusion 62

4.1 Introduction

Le contrôle de la chaîne du froid prend de plus en plus d'importance en raison du nombre croissant de médicaments et de produits alimentaires soumis à des conditions de contrôle très rigoureuses (par exemple leur conservation sous des températures basses).

En effet, une supervision inadéquate dans les entrepôts ou durant le transport de produits sensibles à la température extérieure engendre des coûts énormes pour l'industrie et cause parfois des intoxications dans les populations. Le contrôle de température est donc d'une importance capitale dans le suivi de

la chaîne du froid et les services de traçabilité. Cependant, ce contrôle ne peut être garanti au niveau de tous les points de la chaîne et en particulier durant la phase de transport en raison des opérations de manutention comme le chargement et le déchargement des palettes dans le véhicule de transport et aussi parce que ce dernier n'est pas aussi bien équipé qu'un entrepôt.

Dans ce chapitre nous présentons une solution protocolaire pour superviser la chaîne du froid que nous avons proposée dans le cadre du projet ANR-CAPTEURS. La solution est destinée au contrôle et à la surveillance de la température durant la phase de transport. Nous entendons par là le déploiement d'un réseau de capteurs dans un véhicule de transport comme un camion par exemple. Afin d'obtenir une solution bon marché et réutilisable, la solution retenue par les partenaires du projet a été d'intégrer directement les capteurs dans les palettes.

4.2 Problématique et scénario retenu

Le suivi de la chaîne du froid repose sur un ensemble de dispositifs complémentaires. Les besoins exprimés par les utilisateurs font apparaître que de nombreux embryons de solutions permettent d'ores et déjà de surveiller le froid dans les entrepôts avec des systèmes d'alarme. Par conséquent, dans la phase expérimentale que nous étudions, on peut considérer que les capteurs peuvent se contenter de mesurer la température régulièrement mais n'ont pas forcément à se préoccuper de communiquer entre eux pendant ces périodes.

Nous nous sommes donc concentrés sur la phase de transport au cours de laquelle les systèmes précédemment évoqués ne sont pas présents. Des relevés sont parfois effectués dans les camions mais le positionnement des dispositifs de relevés loin de la porte est particulièrement sujet à caution. Pour mettre en œuvre une solution qui n'impose aucun équipement spécifique à l'intérieur des camions, il est désormais exclu d'avoir un système de type « Station de Base » ou *Sink* qui dirigerait l'ensemble des communications et qui pourrait s'interfacer avec des systèmes de communication extérieurs. Le principe retenu est alors le suivant :

- Les capteurs présents dans un camion doivent s'organiser pour échanger des informations au cours du transport ;
- L'absence de communication avec le monde extérieur rend inutile le déclanchement d'alarmes en temps réel ;
- Les capteurs se contentent alors de mesurer la température et de communiquer en temps différé leurs alarmes éventuelles.

Le scénario retenu sera alors le suivant. Les palettes munies de capteurs sont chargées dans le

camion et par un dispositif extérieur, on les active simultanément. Ne disposant pas lors de la phase d'expérimentation de ce dispositif extérieur permettant d'activer et de donner le coup d'envoi de la première phase, il a été remplacé par une autre technique. En effet, si nous nous donnons un certain temps après la mise en place ou l'activation de tous les nœuds, n'importe quel nœud peut donner le signal de départ. Il s'agira d'une simple balise (trame) qui permettrait à la fois de synchroniser tous les nœuds et de démarrer la première phase du réseau. Cette première phase va se traduire par des échanges d'informations qui permettront à tous les capteurs présents d'avoir une connaissance complète de la composition du camion (présence de capteurs) et de toutes les alarmes éventuelles qui se dérouleront au cours du transport (défaillances de capteurs et alarmes de températures).

Au cours du transport, des palettes pourront être enlevées ou ajoutées au camion. Le réseau doit pouvoir s'adapter à ces modifications. Certains capteurs voyant leur niveau de batterie faiblir préviendront de leur mise en sommeil. A la fin du trajet, un opérateur externe viendra relever les informations. Pour cela, il utilisera un lecteur de type PDA *(Personal Digital Assistant)* pour récupérer les informations sur l'un des capteurs qui devra donc avoir une connaissance complète de tout ce qui s'est déroulé au cours du transport : présence de capteurs, alarmes, « pannes » de capteurs. L'opérateur pourra par conséquent prendre connaissance des informations en interrogeant n'importe lequel des capteurs du réseau.

Afin d'économiser les batteries, un capteur doit arrêter sa radio le plus longtemps possible. En revanche, les autres modules du capteur restent actifs, notamment le *"Sensing Module"* qui relève la température périodiquement et enregistre les alarmes.

4.3 Analyse du scénario

Le scénario mis en œuvre nous permet d'ores et déjà de tirer les conclusions suivantes :

1. À l'intérieur du camion, les capteurs peuvent être considérés comme en visibilité directe[1]. Par conséquent, on peut envisager de ne faire que des communications de type broadcast ce qui permet de s'affranchir de fonctionnalités compliquées de niveau 3 ;
2. L'absence d'envoi d'informations en temps réel en cas de hausse de la température nous incite fortement à des réveils périodiques avec des échanges de messages entre les nœuds visant à conserver une vision globale du réseau et à communiquer les alarmes éventuelles. Cela assurera en outre une durée de vie supérieure des batteries ; les capteurs fonctionneront l'immense majorité du temps avec la radio éteinte.

[1] Nous verrons dans le chapitre suivant quelques expérimentations qui viendront appuyer cette hypothèse

En fait, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, il vaut mieux garder la radio éteinte que de la laisser en mode *"idle"* car la consommation dans ce mode n'est pas négligeable. Dans une étude expérimentale [PB09], cette énergie correspond à la moitié de l'énergie consommée en émission.

La pile de protocoles se fondera donc sur une pile de base Zigbee/IEEE 802.15.4 [Zig05, IEE03]. La couche MAC sera à paramétrer en fonction des protocoles spécifiés. La couche réseau sera minimale. Tous les nœuds seront des *"FFD"*[2]. La justification en est simple : l'absence de Station de Base qui pourait être alimentée électriquement rend le mode maître/esclave peu adapté car cela imposerait qu'un nœud joue le rôle de point central. Cela poserait des problèmes d'élection, de changement périodique, etc.

L'essentiel de l'effort portera donc sur la spécification de protocoles applicatifs afin de mettre en œuvre les objectifs fixés. Nous pouvons donc distinguer les différentes phases suivantes dans les échanges qui vont donner lieu à des protocoles de niveau applicatif.

- *Initialisation* (P1) : Lors du chargement des palettes, les capteurs vont démarrer des phases de reconnaissance mutuelle pour mettre en place une vision exhaustive de l'état du réseau après chargement ;
- *Ajout d'un capteur* (P2) : au cours du transport, des capteurs pourront être ajoutés au chargement et devront donc s'insérer dans les communications ;
- *Suppression planifiée d'un capteur* (P3) : un capteur sentant son niveau de batterie faiblir devra prévenir les autres nœuds de son extinction prochaine ;
- *Suppression non planifiée de capteurs* (P4) : au cours du trajet, certaines palettes peuvent être déchargées, le système doit continuer à fonctionner ;
- *Régime permanent* (P5) : les nœuds se réveilleront régulièrement pour signaler leur présence, remonter les alarmes ;
- Envoyer à un utilisateur final l'ensemble des données collectées lors du transport (P6).

(P5) devra bien sûr s'accommoder de (P2), de (P3) et de (P4).

4.4 Solutions

Les solutions proposées doivent se fonder sur des algorithmes et des protocoles efficaces qui minimisent la consommation d'énergie. L'objectif est d'établir un ordonnancement performant qui organise

[2] FFD pour *Full Function Device*, dispositif ayant toutes les fonctions possibles, contrairement aux *RFD (Reduced Function device)*.

le cycle de sommeil et d'activité des nœuds dans ces réseaux puisque le temps d'activité des capteurs doit être très inférieur à celui d'inactivité et que la radio consomme nettement plus d'énergie que n'importe quel autre composant matériel d'un capteur. Dans le cadre du projet, deux solutions ont été envisagées : une solution avec des réveils groupés et une autre qui construit un anneau virtuel.

4.4.1 Réveils groupés

Les réveils groupés sont la première solution envisagée. Les capteurs se réveillent régulièrement et se tiennent informés de l'état courant du réseau. On peut alors considérer que le protocole (P1) et le protocole (P5) seront sensiblement identiques. Le principe consiste donc à mettre en place un mécanisme de réveils groupés des capteurs (cf. Fig. 4.1). Durant leur phase d'activité, tous se tiendront informés de l'état du réseau en terme d'alarmes, de disparition de nœuds, etc.

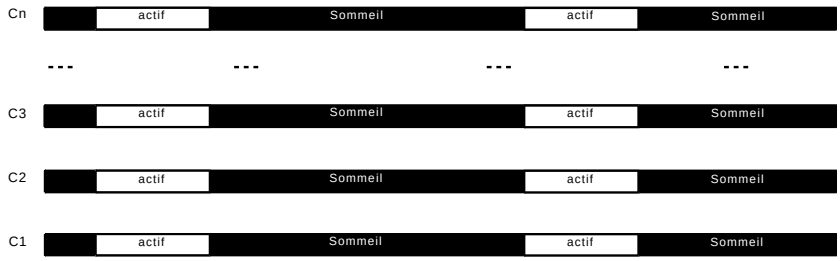


FIG. 4.1 – Solution avec un ordonnacement du sommeil.

Le premier inconvénient d'une telle solution est le nombre de collisions dues à la contention durant les périodes d'activité où tous les nœuds essayent de diffuser leur information. Une organisation des échanges des temps de paroles est alors envisageable. En revanche, il subsistera la surconsommation d'énergie à cause de l'*overhearing* et de la diffusion. En effet, les nœuds diffuseront leurs informations aux autres à tour de rôle. Il n'existe alors aucune technique d'agrégation ou de regroupement de données.

4.4.2 Création d'un anneau virtuel

Le but de cette deuxième solution « Placide[3] », est d'organiser les temps de paroles des différents capteurs de façon à minimiser les collisions et les retransmissions éventuelles. L'établissement d'un ordonnancement de sommeil aléatoire des nœuds n'est pas recommandé parce qu'il exerce un effet néfaste sur la connectivité dans le réseau et sur l'efficacité du contrôle de la topologie, il faut se méfier de ne pas tomber dans une période de blocage de communication pendant laquelle aucun nœud n'est

[3]Le nom de code de la solution est *Placide* en référence au calme et à la sérénité des nœuds lors de leurs échanges d'informations (pas de contention, pas de collisions, ...)

actif pour faire passer les paquets vers le nœud suivant. Pour limiter ces périodes, on essaye de former un anneau avec le nombre maximum de nœuds.

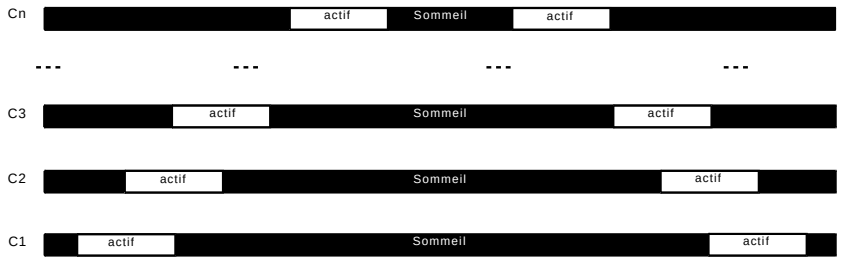


FIG. 4.2 – Solution avec un ordonnacement du sommeil.

L'objectif est alors d'avoir des périodes de silence très grandes entrecoupées de périodes d'activité au cours desquelles les nœuds se réveillent les uns après les autres afin de récupérer les informations du nœud prédécesseur sur l'anneau virtuel construit puis de les communiquer au nœud suivant. Les périodes d'activité des différents nœuds vont donc se chevaucher en faisant en sorte d'avoir au maximum deux nœuds actifs à un instant donné (cf. Fig. 4.2). En régime établi (anneau virtuel construit et pas d'insertion ni disparition de nœuds), les nœuds peuvent avoir tous la même durée d'activité T_{actif} et d'endormissement T_{sleep}.

La durée d'activité peut elle-même être découpée en deux parties sensiblement égales : une période d'écoute où l'on attend les informations du nœud précédent et une période d'émission au cours de laquelle on va émettre les informations vers le nœud suivant.

Cette solution suppose en effet que tous les capteurs doivent être synchronisés (au moins deux par deux). La solution est fondée sur l'idée de construire une chaîne virtuelle entre les capteurs. Le modèle conceptuel du réseau peut être instancié en deux variantes en organisant la chaîne soit sous forme de liste circulaire ou bien sous forme de liste doublement chaînée. Ces deux variantes se fondent sur l'hypothèse que tous les capteurs sont à portée les uns des autres (mais la variante avec une liste doublement chaînée est plus robuste vis à vis de ce problème de portée).

La mise en place de ce cette solution se fait en deux étapes : Initialisation (synchronisation et construction de la chaîne) et contrôle (veille et mise à jour de l'état des capteurs). Cette synchronisation incombe à la phase d'initialisation que nous détaillerons dans la description du protocole (P1). L'utilisateur allume tous les capteurs (soit par un signal électromagnétique soit manuellement). Pendant cette phase, les capteurs commencent à envoyer les informations nécessaires pour construire la chaîne au bout d'un délai aléatoire (afin de réduire les collisions). Chaque capteur calcule sa période d'activité en fonction du capteur prédécesseur dans la chaîne. Une fois le capteur inséré dans la chaîne il peut

s'endormir.

La phase de contrôle permet à chaque capteur de signaler sa présence ainsi que d'éventuelles alarmes a(ux) successeur(s) dans la chaîne. Si un capteur "arrive" pendant cette phase il sera inséré dans la chaîne. Pour cela, il doit rester en éveil jusqu'à la fin du cycle. S'il arrive pendant la période de sommeil, il devra attendre la période d'activité suivante. Des arrivées groupées pendant la phase d'activité sont sans doute gérables. En revanche, des arrivées groupées pendant une période de sommeil vont se traduire par la création d'un deuxième cycle potentiel. La solution préconisée sera de conserver actif le dernier nœud du nouveau cycle qui se chargera d'écouter si un autre cycle n'a pas été précédemment formé. Pour se faire, il écoutera une période de sommeil complète (la première fois). Ces arrivées de capteurs correspondent à des chargements partiels du camion. Plusieurs palettes peuvent être chargées en un laps de temps court. Leur activation peut se traduire du point de vue du réseau par une arrivée simple ou groupée selon le degré de synchronisation lié à leur activation.

4.4.2.1 Des acquittements applicatifs

Un protocole très simple consiste à accuser réception des informations reçues de façon à ce que le nœud précédent puisse tranquillement se rendormir. En toute rigueur, il n'y a pas de risque de collision donc le protocole MAC n'a donc pas à être durci et le mécanisme d'accusés de réception permet de relancer les messages en cas d'erreur de transmission. Différents choix se présentaient pour le niveau à utiliser pour les accusés de réceptions : soit au niveau MAC, soit au niveau applicatif. Le niveau applicatif va gérer les phases d'endormissement et de réveil des capteurs. Il y a donc besoin d'accusés de réception à ce niveau. En revanche les accusés de réception de niveau 2 perdent de leur intérêt et par conséquent, nous avons décidé de les inhiber. Il convient néanmoins de renforcer ce protocole pour traiter les cas de figure de disparition/apparition de nœuds.

Essayons à présent de regarder plus en détail le fonctionnement du système. Pour une première ébauche de solution, nous avons donc considéré différents problèmes à résoudre :

- *Planifier le réveil et l'endormissement de chaque capteur.* Il faut faire en sorte que tous les capteurs aient le même fonctionnement dans la mesure du possible.
- *Former la chaîne et le cycle.* Il s'agit ici de construire la chaîne virtuelle en échangeant les informations de présence et en synchronisant les différents capteurs selon un ordre donné.
- *La disparition et l'ajout d'un capteur.* Si un capteur est déplacé et qu'il n'est plus à portée des autres alors la chaîne doit être mise à jour en tenant compte de cette disparition. De la même façon nous avons également à prendre en compte l'insertion d'un capteur dans la chaîne. On peut raisonnablement considérer que la probabilité pour qu'un nouveau capteur vienne s'ajouter à la

chaîne de contrôle une fois que celle-ci est construite est assez faible. La probabilité pour qu'un capteur apparaisse et vienne s'insérer pendant la période d'activité d'une chaîne déjà construite est encore plus faible.

- Formaliser la phase d'initialisation, qui est probablement la phase la plus consommatrice en terme d'énergie.

L'absence de système de traitement en temps réel des alarmes par interconnexion avec un autre système de communication fait que les alarmes seront envoyées en différé aux différents nœuds au cours d'une période active de communication. On peut alors décider d'arrêter le capteur qui a une alarme (en lui faisant couper sa radio) ; on est alors dans le cas d'un arrêt programmé du capteur (cf. paragraphe concerné) ou bien considérer que le capteur peut continuer à fonctionner pour signaler sa présence et l'on peut encore envisager de lui faire réémettre périodiquement son alarme ou non.

Une solution simple pour traiter la plupart des problèmes d'insertion/suppression de capteurs serait d'avoir en permanence un capteur éveillé : soit en ayant des périodes d'activités longues, soit en conservant en fin de cycle un capteur éveillé et en faisant tourner cette responsabilité. Cette solution n'est pas raisonnable car elle conduira immanquablement à l'épuisement prématuré des batteries. On ne va donc considérer par la suite que des périodes d'endormissement très grandes par rapport aux périodes d'activité, ce qui va entraîner une complexité en terme de protocoles. Ce sont les capteurs qui tenteront de s'insérer qui devront faire l'effort en terme de consommation d'énergie.

4.4.2.2 Initialisation et configuration de la chaîne

Cette phase est probablement la plus délicate. Un signal électromagnétique fort met en marche tous les capteurs. Chaque nœud i tire une durée aléatoire d'« écoute » du support $T_{al,i}$. Au niveau applicatif cette période d'écoute est en fait une période d'inactivité où l'on attend qu'un premier nœud se déclare. Le capteur qui a le plus petit $T_{al,i}$ envoie un message de synchronisation `SYNC` en fournissant son adresse MAC, il s'attribue le numéro *"1"* dans la chaîne et indique la date de son prochain réveil. Dans le meilleur des cas, aucun autre nœud ne s'est lancé en même temps et il n'y a pas d'erreur de transmission. Dans ce cas de figure, tous les nœuds actifs reçoivent ce message. Ils vont tous tirer une nouvelle durée aléatoire (on aurait pu utiliser la valeur résiduelle du premier tirage mais avec un risque accru de collision). Au bout de cette durée, l'un d'entre eux va émettre un acquittement `SYNC-ACK` en s'attribuant le numéro *"2"*, en fournissant son adresse MAC et en calculant sa date de réveil.

Dans le meilleur des cas encore une fois, aucune collision ni erreur n'a lieu. Dans ce cas, le premier nœud de l'anneau en construction peut se rendormir et l'on poursuit la construction du cycle. Une fois que le dernier nœud a émis son message, plus personne ne répond. Il pourrait se rendormir.

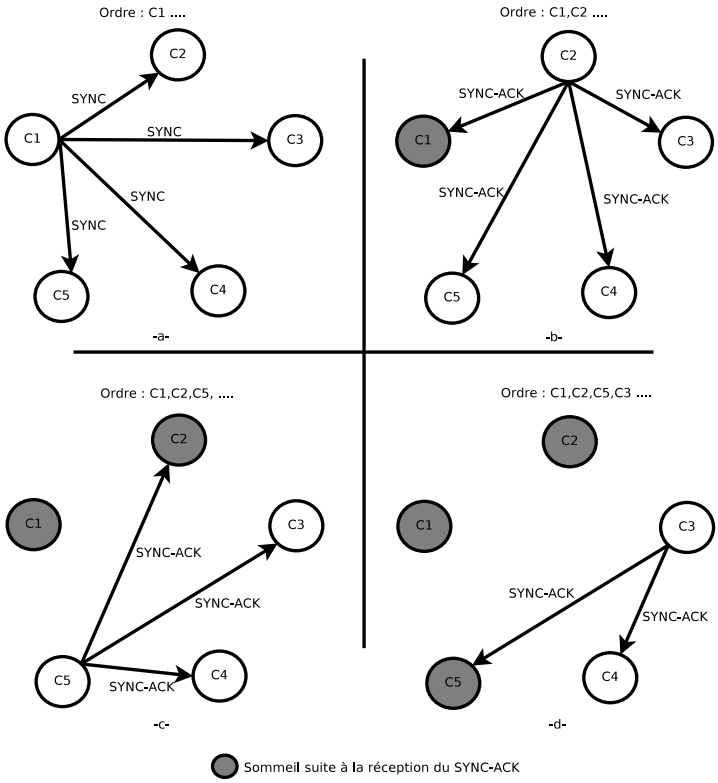


FIG. 4.3 – Illustration de l'initialisation du réseau.

L'inquiétude que l'on peut avoir, comme nous l'indiquerons dans la partie suivante qui concerne l'ajout d'un nœud, c'est la création d'un deuxième cycle en parallèle lors de l'ajout groupé de palettes. Dans ce cas de figure, le cycle qui se crée ne peut pas savoir s'il est le premier à se construire ou s'il en existe déjà un. Par conséquent, pour fiabiliser l'ensemble, on propose de laisser en écoute le dernier nœud du cycle (on pourrait répartir l'effort). Si au cours du sommeil des autres nœuds, il détecte qu'un cycle avait été créé préalablement (il entend un message normal), il passe dans la phase d'insertion d'un nœud (cf. paragraphe suivant). Lors du réveil des nœuds suivants, il les informera de l'existence de cet autre cycle et ils s'ajouteront naturellement lors du cycle suivant de l'autre anneau.

Venons-en maintenant à quelques exceptions qui peuvent survenir. Supposons tout d'abord que deux nœuds émettent simultanément leur message `SYNC` ou qu'il y ait une erreur de transmission sur ce message. Ces simultanéités de niveau applicatif peuvent en fait se traduire de deux façons. Soit il y a simultanéité au niveau MAC et dans ce cas, il y aura une collision. Soit il n'y a pas exactement simultanéité. Dans ce cas, une trame sera émise, le CSMA bloquera les autres. Ces messages seront émis à leur tour (avec des collisions éventuelles). Au niveau applicatif, ils seront simplement ignorés car

il ne sont pas les premiers. La période de vulnérabilité commence quand le premier nœud décide (au niveau applicatif) d'envoyer son message et se termine quand ce message est reçu au niveau applicatif par tous les nœuds.

Dans ce cas de figure, les couches MAC ignorent les messages et aucun niveau applicatif n'est informé. Dans ce cas, le nœud qui a émis son `SYNC` va le réémettre en entrant en concurrence avec les autres nœuds. La chaîne n'est pas créée. Chaque nœud répétera ses tentatives un certain nombre de fois (en utilisant par exemple un algorithme de back-off). Une fois que la limite du nombre de tentatives est atteinte et que le nœud n'a rien reçu, il devine qu'il est seul au monde. Il repassera en écoute longue pour savoir s'il y a un cycle déjà constitué (cf. paragraphe suivant).

Un problème complètement symétrique sera celui de réponses `SYNC-ACK` simultanées. De la même façon, l'émetteur du message `SYNC` ne recevant pas sa réponse, il réémettra son message. Aucun autre nœud n'émettra de message `SYNC` dans cette période. De nouvelles collisions pourront toutefois intervenir entre un message `SYNC` et un ou plusieurs messages `SYNC-ACK`. Le dimensionnement des temporisations reste à faire.

Placide par rapport à Token Bus

La solution que nous venons de décrire peut faire penser à une architecture Token Bus (IEEE 802.4). C'est une architecture en anneau logique avec une méthode d'accès par passage de jeton. Dans la phase d'initialisation du Token Bus, lorsque la première station arrive, elle note d'abord le fait qu'il n'y a pas de trafic pendant une période donnée. Ensuite, elle diffuse une trame *"CLAIM_TOKEN"*. N'ayant pas reçu de réponse, elle crée elle même le jeton et construit l'anneau. Par la suite, elle envoie périodiquement des trames pour solliciter un éventuel successeur *("SOLIT_SUCCESSOR")*. À mesure que d'autres stations s'allument, elles répondront à la sollicitation et rejoignent l'anneau. Si les deux première stations sont allumées en même temps, elle sont autorisées à demander le jeton en utilisant l'algorithme du *Binary Countdown* [Tan02]. C'est un algorithme utilsé pour résoudre la contention. La configuration est donc un peu différente car nous nous plaçons volontairement dans un cas de figure où plusieurs stations démarrent simultanément contrairement à Token Bus où il est préférables que les stations se déclarent les une après les autres. Par ailleurs, l'organisation mise en œuvre au niveau applicatif et non au niveau 2. Dans le contexte IEEE 802.15.4 nous ne pouvons malheureusement pas envisager de régler la résolution des conflits comme cela peut se faire sur une solution en bus (802.4 ou RNIS).

4.4.2.3 Régime Permanent

A la fin de la partie initialisation du réseau, le cycle est formé et c'est le dernier capteur ajouté au cycle qui construit le premier message `MSG` à son réveil et commence à émettre vers le capteur suivant. Le premier cycle repart ainsi dans le sens contraire de sa formation en raison d'éventuels problèmes de portée radio. Le dernier capteur est le seul à disposer de la totalité des informations, notamment le nombre total de capteurs dans le réseau ainsi que leurs adresses. La figure 4.4 en illustre le principe.

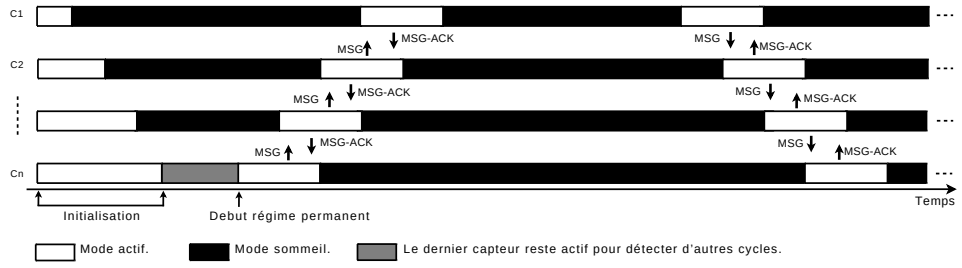


FIG. 4.4 – Régime permanent.

Nous pouvons distinguer trois comportements en régime permanent correspondant chacun à la position du capteur dans la chaîne : au début, au milieu ou à la fin de celle-ci.

Régime permanent pour le premier capteur de la chaîne

À son réveil, le premier capteur de la chaîne, construit le message `MSG` avec toutes les informations pertinentes concernant l'état du réseau (nombre de capteurs, nouveaux nœuds ie. tous les nœuds lors du 1er cycle, alarmes collectées lors du cycle précédent, etc.), il envoie le message en fournissant son numéro dans le cycle et rentre dans une phase d'écoute dans l'attente d'un `MSG-ACK` pour s'endormir à nouveau.

Dans le meilleur des cas, le message est reçu par le capteur suivant et ce dernier renvoie le `MSG-ACK`. Dans le cas contraire, le premier capteur répétera ses tentatives un certain nombre de fois. Une fois que la limite du nombre de tentatives est atteinte et que le capteur n'a toujours pas reçu le `MSG-ACK`, il suppose que le capteur suivant est perdu. Il rentrera donc dans la phase "perte de capteurs" (cf. paragraphe 4.4.2.4).

Régime permanent pour un capteur C_i dans la chaîne

Il se décompose en deux phases distinctes. En effet, un capteur se situant au milieu de la chaîne doit d'abord recevoir correctement le message de son prédécesseur, le traiter puis l'envoyer à son successeur dans la chaîne.

Dans le meilleur des cas, le capteur C_i reçoit bien le `MSG`, l'acquitte, le renvoie vers le suivant et s'endort normalement après la réception du `MSG-ACK` de son successeur. Sinon, C_i peut être amené à traiter deux cas de disparitions : soit la disparition de C_{i-1} en cas d'absence du message `MSG` au début des échanges ; soit disparition de C_{i+1} en cas d'absence d'acquittement `MSG-ACK`, de son successeur (cf. figure A.3 dans l'annexe A).

Il est possible que C_i continue de recevoir le message `MSG` de son prédécesseur C_{i-1} même après l'avoir acquitté. En effet, dans le cas d'erreurs de transmission entraînant la perte du `MSG-ACK`, C_{i-1} continue à envoyer son message et dans ce cas là C_i n'a qu'à l'acquitter de nouveau.

Régime permanent pour le dernier capteur de la chaîne

À son réveil, le dernier capteur de la chaîne entre dans une phase d'écoute afin de recevoir le message `MSG` de son prédécesseur. S'il reçoit bien ce message il l'acquitte, puis il reste un court instant au cas où un nouveau nœud désirerait s'insérer et enfin il s'endort à nouveau.

4.4.2.4 Disparition imprévue d'un capteur

La disparition imprévue d'un capteur se traduit par l'absence de réponse qu'il fournira à son prédécesseur dans l'anneau. Ce mécanisme d'acquittement explicite permet de rendre le fonctionnement du système plus robuste en traitant également les erreurs potentielles de transmission.

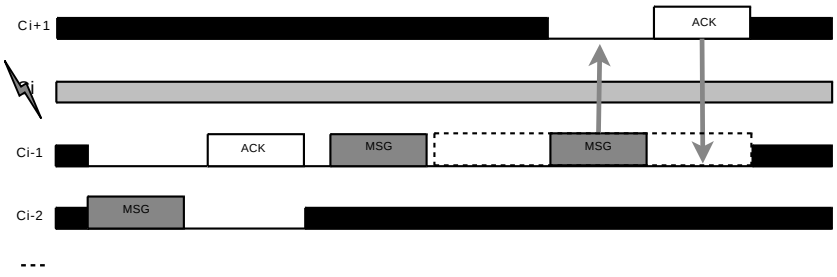


FIG. 4.5 – Disparition d'un capteur.

Si le capteur C_k est perdu (n'est plus à portée), les capteurs voisins doivent réagir (C_{k-1} et C_{k+1}), mais C_{k+1} est encore en sommeil donc c'est C_{k-1} qui va essayer de remplacer C_k. Dans un premier temps, C_{k-1} veut envoyer des messages vers C_k, découvre alors que ce dernier n'est plus dans la chaîne il prolonge sa période d'activité pour ce cycle. Notons que pour des raisons de fiabilité (erreur de transmission sur les messages et/ou les acquittements), il sera nécessaire de renvoyer potentiellement plusieurs fois les messages. Au bout d'un certain nombre de tentatives, C_{k-1} décrète que C_k a disparu

et s'adresse à C_{k+1} . Le problème est à peu près réglé et le capteur suivant C_{k+1} reçoit les messages et la chaîne et continue son fonctionnement.

En particulier, les erreurs successives potentielles ainsi que des phénomènes de dérive d'horloge peuvent intervenir. Par conséquent, des réveils prématurés peuvent avoir lieu. la réception d'un message à destination d'un prédécesseur sur l'anneau doit donc être ignorée (il se peut en effet que soit le nœud en question ait effectivement disparu ou bien que ce soit son acquittement qui n'ait pas été reçu). Nous préconisons par conséquent que les messages applicatifs soient explicitement destinés au bon capteur alors qu'au niveau MAC, on se contentera de *Broadcast* ce qui facilite grandement la phase d'initialisation et rassure le niveau applicatif en régime établi puisqu'à son réveil, le nœud obtiendra rapidement des messages même si on est un peu en retard. Lors des cycles suivants, les nœuds étant prévenus de la disparition d'un nœud agiront en conséquence. Il va falloir un cycle complet pour que tous les nœuds soient informés et revoient leurs dates de réveils pour les prochains cycles.

4.4.2.5 Disparition annoncée d'un capteur

Une autre des fonctionnalités que nous avons proposée est la disparition annoncée d'un capteur. Quand le niveau de la batterie passe un certain seuil, le nœud va éteindre sa radio. Pour ne pas perturber le fonctionnement du réseau, il préviendra dans le cycle précédant son arrêt. Cela peut se faire simplement de la façon suivante :

- Quand il reçoit le message du prédécesseur $(i-1)$, il glisse dans son acquittement sa disparition au tour suivant ;
- Quand il redonne le message au nœud suivant $(i+1)$, il le prévient de sa disparition au tour suivant.

Au tour suivant, le nœud précédent $(i+1)$ enverra directement son message au nœud suivant $(i-1)$. En cas de non-réception de l'information par le prédécesseur, cela sera traité comme une disparition non-annoncée (on pourrait envisager que le nœud suivant réponde directement au nœud prédécesseur mais cela complique davantage le protocole que cela ne fait gagner de temps).

Tous les nœuds en aval du nœud qui s'arrête seront prévenus et donc leur réveil lors du cycle suivant pourra être directement décalé.

4.4.2.6 Ajout d'un nouveau nœud ou de plusieurs nœuds

Un nœud qui apparaît va déclancher un mécanisme d'initialisation du même type que le précédent (il ne peut pas savoir qu'il est arrivé en cours de route). Plusieurs cas de figure peuvent alors se présenter

selon que le nœud arrive seul ou en groupe et selon qu'il arrive au cours d'une période de silence ou d'activité du cycle en cours.

Pour l'arrivée d'un ou plusieurs nœuds au cours d'une période d'activité. Les nœuds écoutent le support dans leur phase d'initialisation. Il faut donc que cette période soit suffisamment longue pour pouvoir recevoir des messages normaux d'un cycle déjà établi (de façon à éviter la création d'un deuxième cycle en parallèle et l'ajout immanquable de collisions et d'incohérence dans le protocole). La réception d'un message indiquant la présence d'un cycle déjà établi se traduira par l'attente de la fin du cycle. Les PDU devront contenir les informations nécessaires pour que les nœuds puissent se préparer à parler. Quand le dernier nœud du cycle reçoit le message de l'avant-dernier, on peut envisager qu'il émette un message de type « y a-t-il quelqu'un de nouveau ? » ou bien que de façon implicite il reste à l'écoute et que les nouveaux capteurs signalent leur présence. En utilisant une technique du même type que lors de la création du cycle, on ne fera que prolonger le cycle.

Le cas le plus fréquent sera celui de l'arrivée d'un ou de plusieurs capteurs au cours du sommeil des capteurs. Le cas d'arrivées groupées est assez probable car, lors d'un chargement partiel du camion, plusieurs palettes seront ajoutées. La difficulté de l'analyse provient du démarrage des capteurs.

En effet, chaque capteur va démarrer son étape d'écoute du support. Si rien n'est échangé, il va tenter de former un cycle. Si les capteurs démarrent de façon assez rapprochée, ils vont créer instantanément un nouveau cycle ; on traitera alors le raccordement au premier cycle en utilisant la technique évoquée dans le paragraphe 4.4.2.2 sur l'initialisation. Si leurs démarrages sont trop décalés, les capteurs ne pourront pas former de cycle aussi simplement. Ils s'agglomèreront les uns aux autres mais les réveils seront espacés lors du cycle suivant et il conviendra de les intégrer potentiellement un par un au cycle principal.

Pour finir, il faudra que rapidement les capteurs récupèrent l'ensemble des informations qui ont été échangées depuis le début du chargement.

4.5 Évaluation de performances

Dans cette section nous nous proposons d'analyser les performances des protocoles. Nous présentons dans un premier temps un modèle analytique et nous comparerons ses résultats avec ceux des simulations. Par la suite, nous discutons ces résultats et proposons quelques améliorations aux protocoles. Les critères de performance de la solution sont la consommation d'énergie de chaque nœud, les temps d'initialisation et la durée de vie du réseau.

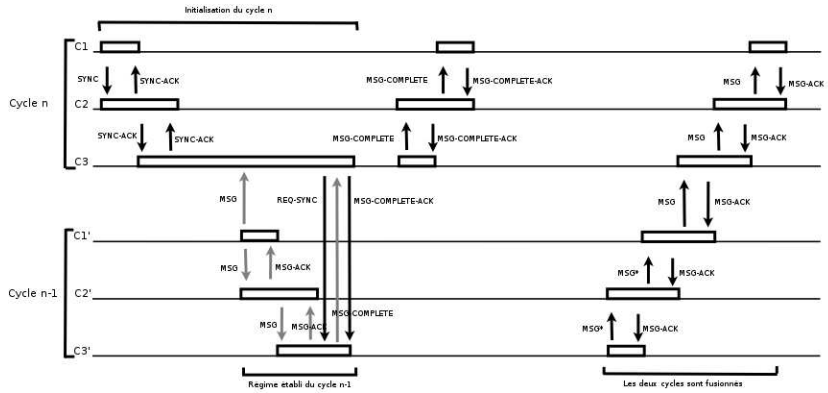


FIG. 4.6 – Fusion de deux Cycles.

4.5.1 Modèle analytique

Un modèle analytique pour le protocole d'initialisation et celui du régime permanent sont nécessaires pour évaluer leurs performances et les dimensionner d'une part, puis conforter les résultats obtenus par simulations d'autre part.

4.5.1.1 Phase d'initialisation

Afin d'éviter au maximum les collisions durant la phase d'initialisation, les nœuds écoutent le support pendant une durée aléatoire T_a uniformément[4] répartie dans l'intervalle $[0, T_{max}]$.
L'espérance mathématique de la durée T_a est :

$$\mathbb{E}[T_a] = \frac{T_{max}}{N+1} \tag{4.1}$$

Où T_{max} est la valeur maximum de la temporisation, N est le nombre de nœuds. Soit T_1 le temps d'initialisation du premier nœud de la chaîne. On peut facilement trouver :

$$\mathbb{E}[T_1] = \frac{T_{max}}{N+1} + T_{SYNC} + \frac{T_{max}}{N} + T_{SYNC-ACK} \tag{4.2}$$

Nous pouvons également déduire le temps moyen d'initialisation du i^{eme} nœud dans la chaîne :

$$\mathbb{E}[T_i] = \mathbb{E}[T_{i-1}] + \frac{T_{max}}{N-i+1} + T_{SYNC-ACK} \tag{4.3}$$

En revanche, il y a une légère différence pour le dernier nœud qui rejoint la chaîne. Ce dernier aura forcément à retransmettre son message θ fois car aucun autre nœud n'acquittera ses messages. Par

[4] Nous ne connaissons pas *a priori* le nombre de capteurs donc le choix de la loi est classique.

ailleurs, il attendra une autre période T_W pour voir s'il y a pas un autre cycle déjà formé qui démarre son régime permanent. À la fin de cette période, le nœud s'endort.

$$\mathbb{E}[T_N] = \mathbb{E}[T_{N-1}] + \theta T_{RET} + (\theta - 1)T_{SYNC-ACK} + T_W \tag{4.4}$$

4.5.1.2 Consommation d'énergie

Les formules 4.2, 4.3 et 4.4 mettent en évidence différents modes par lesquels passent les nœuds : écoute, réception et émission. Dans les présentes formules, nous ne faisons pas apparaître les coûts liés à l'allumage/extinction de la radio. Ces coûts sont fixes et ne peuvent pas être améliorés (à moins que de laisser la radio en permanance allumée, ce qui est rédhibitoire). Pour estimer la consommation moyenne d'énergie de chacun des nœuds de la chaîne durant la phase d'initialisation, il suffit de rajouter aux formules précédentes l'intensité du courant électrique correspondant à chaque mode (Les valeurs qui sont utilisées plus tard proviennent de [Tmo06]), on obtient alors :

$$E_1 = I_{TX}T_{SYNC} + I_{RX}T_{SYNC-ACK} + I_L T_{max}(\frac{1}{N+1} + \frac{1}{N}) \tag{4.5}$$

Avec E_1 l'énergie moyenne consommée par le nœud *"1"*. Cette énergie est exprimée en Ah tout comme la capacité de la batterie. La tension est supposée constante. I_L, I_{RX} and I_{TX} sont les intensités du courant électrique qui correspondent respectivement à l'écoute, à la réception et à l'émission. La consommation électrique moyenne du nœud i est donc égale à :

$$\begin{aligned} E_i &= I_{RX}T_{SYNC} + I_{TX}T_{SYNC-ACK} + (i-1)I_{RX}T_{SYNC-ACK} \\ &+ I_L T_{max}(\frac{1}{N+1} + \frac{1}{N} + \cdots + \frac{1}{N-i+1}) \end{aligned} \tag{4.6}$$

Comme pour les temps d'initialisation, la consommation augmente en fonction de la position du nœud dans la chaîne et du nombre total de nœuds :

$$\begin{aligned} E_N &= I_{RX}T_{SYNC} + I_{TX}T_{SYNC-ACK} \\ &+ (N-2)I_{RX}T_{SYNC-ACK} \\ &+ I_L T_{max}(\frac{1}{N+1} + \frac{1}{N} + \cdots + \frac{1}{2}) \\ &+ I_L(\theta T_{RET} + (\theta - 1)T_{SYNC-ACK} + T_W) \end{aligned} \tag{4.7}$$

4.5.2 Environnement de simulation

Nous avons évalué les perfomances du protocole d'initialisation avec le simulateur à événements discrets QNAP2 *(Queuing Networks Analysis Package)* [SIM92]. Le protocole ainsi qu'un mécanisme

CSMA ont été modélisés par un modèle à files d'attente. Les paramètres de la simulation sont présentés dans le tableau (Tab. 4.1). Les valeurs des intensités du courant électrique dissipé dans chaque mode de la radio correspondent aux valeurs typiques de la plateforme *Tmote-Sky* [Tmo06].

TAB. 4.1 – Paramètres de la simulation.

Durée des paquets *(ms)*		Consommation électrique *(mA)*	
T_{SYNC}	1.44	I_{TX}	19.5
$T_{SYNC-ACK}$	1.69	I_{RX}	21.8
T_{MSG}	2.58	I_L	21.8
$T_{MSG-ACK}$	1.6		
$N : [10..100]$, $\theta = 3$, $T_A = 0ms$, $T_{max} : [15..120]ms$			

Nous avons tracé les courbes du temps d'initialisation du réseau en fonction de sa taille N (variant entre 10 et 100 nœuds) et la valeur de T_{max} (variant entre 15 et 120 *ms*). D'après les courbes de la figure 4.7 nous remarquons que le temps d'initialisation augmente linéairement lorsque la taille du réseau augmente. Ensuite, pour une taille donnée N du réseau, ce temps accroît également de façon linéaire lorsque T_{max} augmente.

Afin de se rapprocher de la réalité du context applicatif, considérons un réseau de 33 capteurs[5]. Nous avons calculé le temps d'initialisation de chaque nœud dans le réseau en fonction de sa position dans le cycle. Les résultats tracés dans la figure 4.8 soulignent, dans un premier temps, une augmentation linéaire du temps d'initialisation, puis exponentielle pour les derniers nœuds s'ajoutant au cycle. Ce dernier phénomène est dû au nombre de nœuds restants vers la fin de la phase d'initialisation. En effet, d'après la formule (4.1), T_a est inversement proportionnel à N. Par ailleurs, les courbes font ressortir la précision du modèle analytique (en ligne continue) par rapport au résultats de la simulation (aves les intervalles de confiance). Les intervalles de confiance sont inférieurs à 8 %.

Nous avons également calculé l'énergie consommée par les nœuds durant la phase d'initialisation. La figure 4.9 montre les consommations en fonction de la taille du réseau N et de la valeur de T_{max}. On s'est contenté de représenter uniquement l'espérance de la consommation maximale qui correspond en fait à la consommation du dernier nœud de la chaîne puisque c'est lui qui laisse sa radio allumée le plus longtemps. De la même façon que pour le temps d'initialisation, la consommation augmente de façon linéaire en fonction de la taille du réseau et pour une taille donnée N elle croît avec l'augmentation de

[5]Nombre de palettes que peut contenir un camion selon les normes européennes

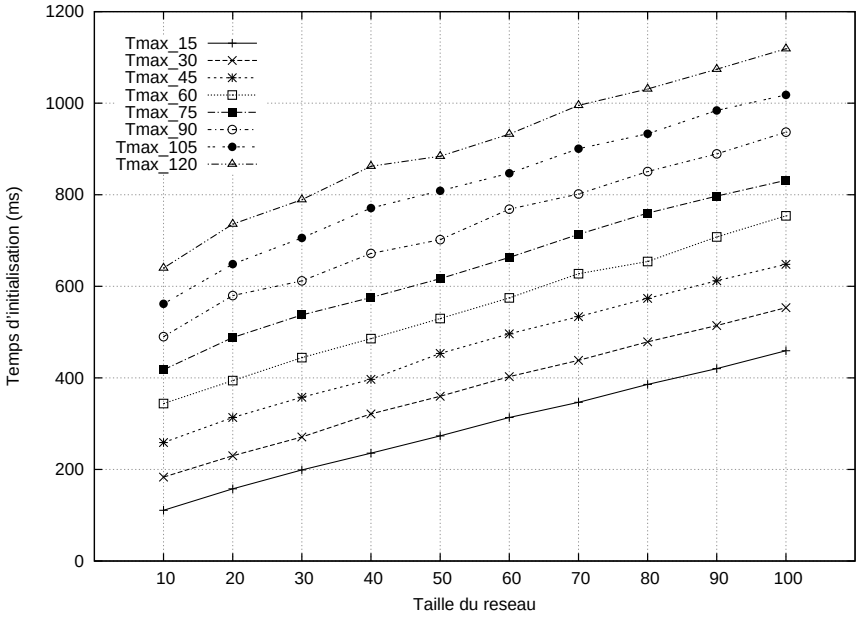


FIG. 4.7 – Temps d'initialisation d'un réseau de capteurs avec différentes tailles et différentes valeurs de T_{max} - Modèle analytique.

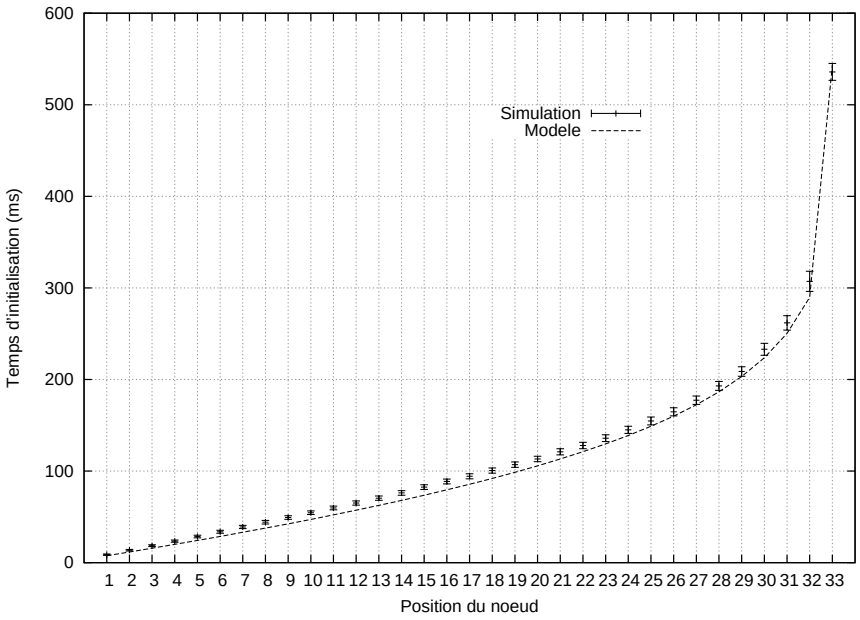


FIG. 4.8 – Résultats du modèle analytique et simulations : temps d'initialisation de chaque nœud d'un réseau de 33 nœuds avec $T_{max} = 75ms$.

T_{max}.

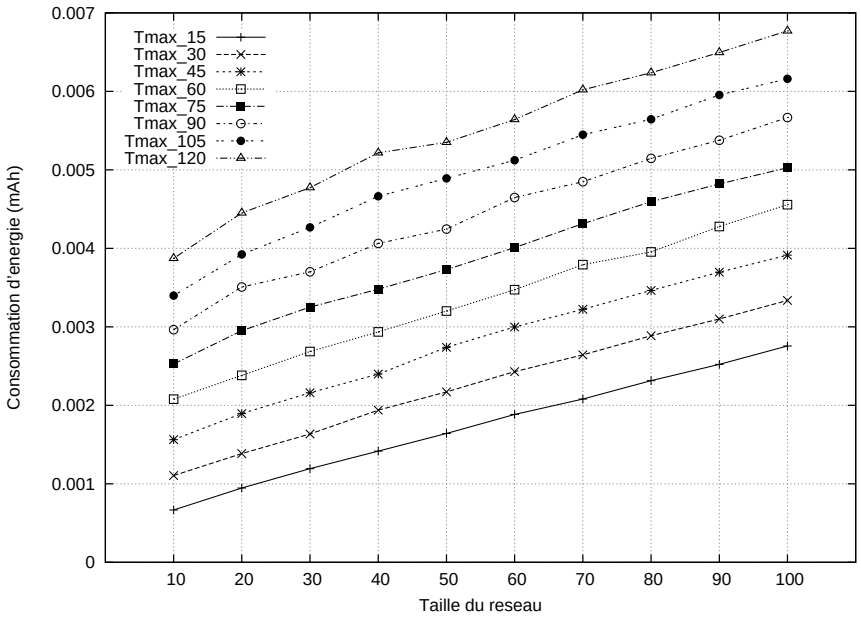


FIG. 4.9 – Consommation d'énergie du dernier nœud lors de l'initialisation du réseau avec différentes tailles de réseau et différentes valeurs de T_{max} - Modèle analytique.

La figure 4.10 montre l'évolution de la consommation d'un nœud en fonction de sa position dans la chaîne. Pour les mêmes raisons que pour le temps d'initialisation, la consommation d'un nœud croît linéairement au début puis exponentiellement pour les derniers nœuds. À la consommation du dernier nœud, vient s'ajouter la consommation due au temps d'attente pour détecter la présence d'autres cycles. De manière générale, nous pouvons constater que le protocole est très économe en énergie.

Remarque : *Nous aimerions attirer l'attention sur le fait que les valeurs de l'énergie correspondent plutôt à des quantités d'électricité exprimées en mAh. Pour retrouver l'énergie réelle consommée en J,on doit les multiplier par la différence de potentiel selon la formule suivante :* $E = \Delta V.I.t$.

Choix de T_{max} :

Le choix de T_{max} est important pour la robustesse de la formation du cycle. Notons que T_{max} doit être robuste vis-à-vis de la variation de nombre de capteurs, c'est-à-dire, que notre réseau doit pouvoir se former si l'on a 33 capteurs mais les performances doivent rester encore acceptables pour une plage de nombre de capteurs comprise entre 10 (chargement partiel du camion) et 40 voire 50 capteurs. On voit que l'on peut former le cycle avec un T_{max} petit (15 ms) en revanche dans ce cas beaucoup de

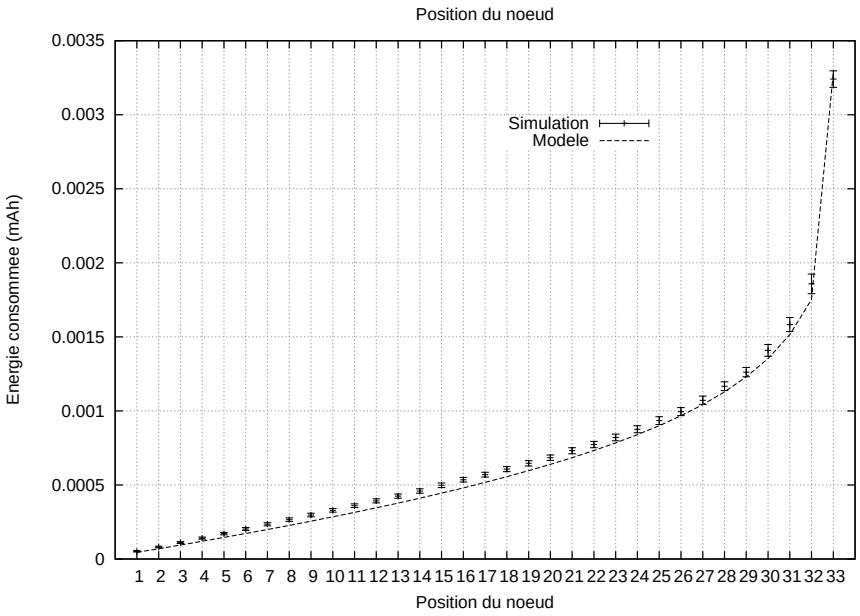


FIG. 4.10 – Résultats du modèle analytique et simulations : consommation d'énergie de chaque nœud d'un réseau de 33 nœuds avec $T_{max} = 75ms$.

collisions surviennent. En effet les courbe tracées dans la figure 4.11 montrent clairement que le nombre de collisions augmente considérablement lorsqu'on diminue T_{max}.

Lorsqu'on dispose d'un petit nombre de capteurs, la valeur de T_{max} aurait pu être réduite. L'inconvénient résulte simplement en un léger surcoût en terme de consommation électrique par rapport à une solution optimale. Pour des valeurs de N plus grandes, cela se traduit par des collisions plus nombreuses voire par un risque que le cycle ne se forme pas. Notons que l'on pourrait envisager d'augmenter le nombre de transmissions mais comme la gestion est applicative, les collisions ne sont simplement pas vues au niveau applicatif.

On peut trouver un compromis entre la robustesse dans la formation du cycle et le temps (et l'énergie) consommé pour que le cycle soit formé. Il faut choisir T_{max} suffisamment grand pour qu'il n'y ait pas de nœuds qui tirent la même valeur de T_a (cf. Équation 4.1). En effet, avec un T_{max} faible, la probabilité que *"deux nœuds tirent sensiblement la même valeur T_a pour que leurs messages respectifs destinés passent sur le support"* augmente. Cela se traduit comme nous l'avons indiqué précédemment par des collisions mais plus probablement par des messages inutiles qui, eux, pourraient provoquer des collisions en raison du mécanisme CSMA. Un T_{max} égal à $75ms$ apparaît comme le plus favorable. Il n'y a pas beaucoup de collisions et le cycle se forme sans aléas. De plus, le temps et l'énergie que chaque nœud consomme pour former le cycle restent faibles.

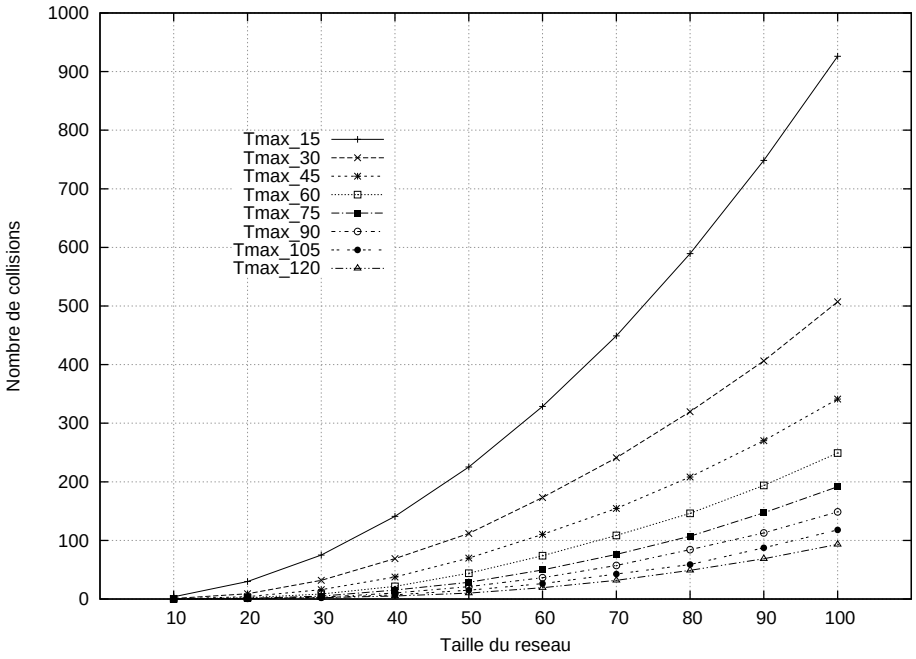


FIG. 4.11 – Nombre de collisions en fonction de la taille du réseau et de la valeur de T_{max}.

4.5.2.1 Analyse du régime permanent

Dans l'analyse du régime permanent, nous allons considérer que les messages sont systématiquement de taille maximale afin de ne pas compliquer l'analyse liée à l'apparition d'alarme qui entraîne des corélations entre les tailles des messages d'un même cycle. Cela peut être vu comme une borne supérieure. Nous nous intéressons à la durée moyenne ($\bar{T}$) d'un échange de messages entre deux nœuds adjacents (Figure 4.12).

Dans cette variante, les périodes de communication sont disjointes, c'est-à-dire que le réveil du nœud C_{k+1} est programmé à la date à laquelle au plus tard les communications entre C_{k-1} et C_k seront finies. Pour cela, si l'on se donne θ transmissions au plus, on obtient un écart entre le réveil de C_k et celui de C_{k+1} égal à $D = \theta(T_{msg} + T_{ack} + 2T_p + 2T_{mcu}) = \theta.T$.

Où T_{msg} est le temps d'émission d'un message `MSG` (de taille maximale) ; T_{ack} est la durée d'un aquittement `MSG-ACK` ; T_p le temps de propagation ; T_{mcu} est le temps nécessaire pour le traitement d'un message par la *MCU*.

On note pour simplifier $T = (T_{msg} + T_{ack} + 2T_p + 2T_{mcu})$ le temps nécessaire à une tentative. Dans cette analyse, les collisions sont considérées comme étant rares vu que le protocole est conçu pour les

éviter. La durée moyenne $\bar{T}$ peut être exprimée avec la formule suivante :

$$\bar{T} = \bar{N}.T \tag{4.8}$$

Où $\bar{N}$ est le nombre moyen de transmissions jusqu'à ce qu'une communication entre deux voisins réussisse. $\bar{N}$ est calculé comme suit :

$$\bar{N} = \frac{1-\bar{\eta}^{\theta}}{\eta} \tag{4.9}$$

η c'est la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur de transmission ni dans le message ni dans l'acquittement et θ le nombre maximum de retransmissions. $\eta = 1 - \bar{\eta} = \bar{\tau}_{msg}\bar{\tau}_{ack}$.
τ_{msg} et τ_{ack} sont les taux d'erreur dans les paquets `MSG` et `MSG-ACK`. On suppose les erreurs indépendantes.

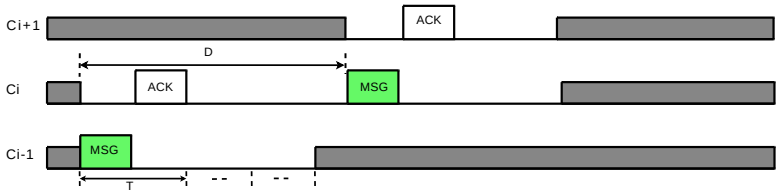


FIG. 4.12 – Analyse du régime permanent.

L'énergie moyenne consommée par un nœud durant un échange avec ses deux voisins est la suivante :

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{N}(E_{Rx,msg} + E_{Tx,ack} + 2(I_L T_p + I_{mcu} T_{mcu})) \\ &+ I_L(D - \bar{T}) \\ &+ \bar{N}(E_{Tx,msg} + E_{Rx,ack} + 2(I_L T_p + I_{mcu} T_{mcu})) \end{aligned} \tag{4.10}$$

$E_{Tx,msg}$ et $E_{Rx,msg}$ sont respectivement les consommations d'énergie en réception et en émission d'un message(`MSG`), $E_{Tx,ack}$ et $E_{Rx,ack}$ sont respectivement les consommations d'énergie en réception et en émission d'un acquittement (`MSG-ACK`). Notons qu'une erreur affectantun paquetse traduit par l'absence d'accusés de réception (et donc une écoute à vide) alors qu'une erreur affectant l'accusé de réception introduit un coût de réception. Les coûts de réception et d'écoute à vide étant identiques, nous n'effectuerons pas de distinction dans la suite des calculs.

I_L et I_{mcu} sont les intensités du courant correspondant respectivement au mode écoute du canal et calcul *MCU*. Comme le montre la figure 4.12, D est la durée qui espace deux réveils de deux nœuds adjacents. Dans les résultats finaux nous n'avons pas tenu compte de la consommation *MCU*.

4.5.3 Amélioration des performances

Dans le régime permanent que nous venons d'analyser, nous avons défini des périodes d'activité identiques pour tous les capteurs, cette durée est calculée en fonction du nombre de retransmissions et de la taille des paquets `MSG` et `MSG-ACK`. Cette solution est fiable et évite les collisions. Cependant en cas d'absence d'erreurs de transmission, les capteurs restent éveillés après la réception de l'aquittement de leur message et consomment alors de l'énergie. Nous présentons dans cette partie deux améliorations possibles pour les performances du régime permanent.

4.5.3.1 Régime permanent avec des réveils au plus tôt

Une deuxième variante du régime permanent consisterait à mettre en place des « réveils au plus tôt » des capteurs en supposant qu'il n'y a pas d'erreurs de transmission. Dans ce cas un capteur doit attendre un temps aléatoire avant de commencer à recevoir, contrairement au cas du réveil au plus tard. L'analyse est cette fois-ci un peu plus complexe dans la mesure où les temps d'attente avant réception du nœud k, W_k va dépendre des communications entre les précédents nœuds (cf. Fig. 4.13).

Calcul du temps moyen d'attente $\bar{W}$ et de l'énergie moyenne $\bar{E}'$

Nous observons aucune attente pour les nœuds *"1"* et *"2"*, soit $W_1 = W_2 = 0$.

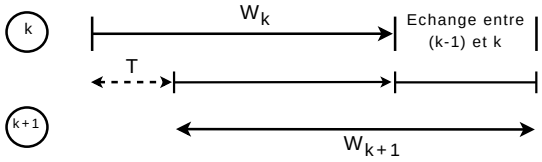


FIG. 4.13 – Analyse du régime permanent avec des réveils au plus tôt.

Le temps d'attente du nœud $k+1$ s'écrit :

$$W_{k+1} = \begin{cases} \mathcal{C}_{k-1,k} - T, & si\ W_k = 0 \\ \\ \mathcal{C}_{k-1,k}, & si\ W_k = T \end{cases} \Rightarrow W_{k+1} = W_k - T + \mathcal{C}_{k-1,k}$$

Avec $\mathcal{C}_{k-1,k}$, la durée de la communication entre k et $k-1$.

L'espérance mathématique du temps d'attente de k+1 est :

$$\mathbb{E}[W_{k+1}] = \mathbb{E}[W_k] + (\bar{N} - 1).T$$

Il vient donc :

$$\mathbb{E}[W_k] = (k-2)(\bar{N} - 1)T, \quad k \geq 3$$

Le temps moyen d'attente $\bar{W}$ serait alors :

$\bar{W} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\mathbb{E}[W_k] = \frac{1}{N}\sum_{k=2}^{N}(k-2)(\bar{N}-1)T$

$$\bar{W} = (\bar{N}-1)T\frac{(N-1)(N-2)}{2N} \tag{4.11}$$

Nous déduisons alors la consommation d'énergie de k :

$\bar{E}_k = \bar{E} + E_{rx}\mathbb{E}[W_k]$, avec $\bar{E}$ énergie moyenne du régime précédent (cf. équation 4.10).

$\bar{E}' = \bar{E} + E_{rx}\{\bar{W} - (\theta - \bar{N}).T\}$

Nous obtenons finalement :

$$\frac{\bar{E}' - E}{E_{rx}T} = (\bar{N}-1)\frac{(N-1)(N-2)}{2N} - (\theta - \bar{N}) \tag{4.12}$$

N le nombre total de nœuds, $\bar{N} = \frac{1-\bar{\eta}^{\theta}}{\eta}$ le nombre moyen de transmissions, $\theta = 3$ le nombre maximum de transmissions, E_{rx} l'énergie consommée en réception et $\eta \sim 0.98$.

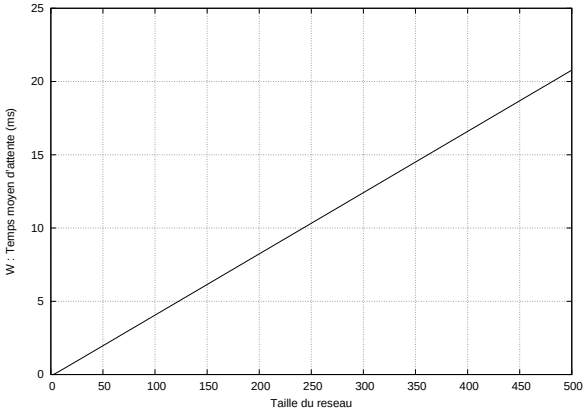


FIG. 4.14 – Résultats Analytiques. Évolution du temps moyen d'attente en fonction de la taille du réseau.

Nous avons calculé analytiquement les temps d'attente moyens. La courbe tracée dans la figure 4.14 montre que le temps d'attente moyen de chaque nœud reste très raisonable par rapport à $2 \times D$ (durée d'activité d'un nœud, cf. section 4.5.2.1) même dans un réseau de grande taille.

Remarque : *Une étude sur la coexistance du 802.15.4 est présentée dans le Standard IEEE 802.15.4 [IEE03]. Le taux d'erreurs paquets du 802.15.4 (PER) est calculé par "simulation analytique" avec plusieurs interferants notamment le 802.11b, le 802.15.1 et le 802.15.3. D'après les résultats, nous avons choisi un* $PER \sim 1$ *%. (i.e.,* $\tau_{msg} = 0.01$*).*

4.5.3.2 De l'auto-organisation pour améliorer les performances

L'auto-organisation est la propriété la plus fascinante que l'on puisse trouver dans les systèmes naturels [Fal07]. Souvent, un grand nombre de sous-systèmes individuels participent dans un objectif commun. L'auto-organisation peut être définie comme l'émergence d'un comportement global à partir d'une interaction locale. Les principes de l'auto-organisation sont de simples algorithmes exécutés par des systèmes actifs et autonomes. *Prehofer* et *Bettstetter* [PB05], décrivent les principes de l'auto-organisation dans les systèmes de communication et présentent quelques paradigmes pour la conception des systèmes auto-organisants. L'un de ces paradigmes préconise d'utiliser une coordination implicite plutôt que de chercher une coordination parfaite.

Un exemple typique peut être trouvé au niveau MAC dans les réseau ad hoc. Supposons qu'un nœud A envoie un message à un nœud B, qui à son tour diffuse le message au nœud C. Si A entend le message de B pour le nœud C, il saura que B l'a bien reçu de A. En d'autre termes, *"l'overhearing"* d'un message peut servir d'acquittement implicite.

Régime permanent avec des acquittements implicites

L'application du paradigme précédent dans le régime permanent, donne lieu à une autre solution que nous formulons comme suit :

Le nœud k peut se réveiller juste à la date à laquelle $(k-1)$ finit de recevoir son message. $(k-1)$ lui envoie à son tour son message. Au lieu d'envoyer un acquittement vers $(k-1)$, il prépare son message vers $(k+1)$ qui tiendra lieu d'acquittement implicite pour $(k-1)$ qui peut se rendormir. Ce sera le message de $(k+1)$ vers $(k+2)$ qui tiendra lieu d'accusé de réception pour k. Ce scénario optimiste doit être analysé en tenant compte des erreurs éventuelles de transmission.

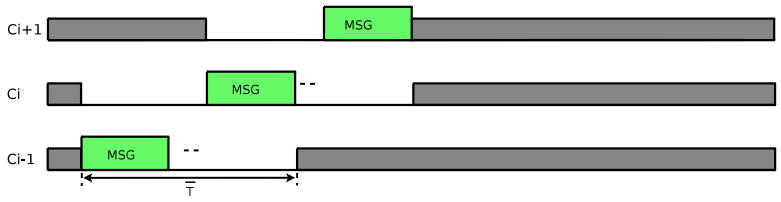


FIG. 4.15 – Régime permanent avec des acquittements implicites.

Nous allons déterminer le temps moyen $\bar{T}$ pendant lequel un capteur sera éveillé (Figure 4.15). Nous pouvons le calculer de la manière suivante : Pour le premier nœud, la date à laquelle il va pouvoir se rendormir s'exprime comme suit :

$\bar{T_1} = \bar{N_1} T_{msg}$, le premier nœuds s'arrête lorsque le message du second est correct. $\bar{N_1}$ fait référence

au nombre de moyen de messages nécessaires, nous le calculerons ultérieurement.

Pour le second nœud, il faut ajouter les échanges avec le le 3-ème nœud (le 1er s'est endormi quand le message du 2-ème a été envoyé correctement).

$\bar{T_2} = T_{msg}\{\bar{N_1} + (2\bar{N_2} - 1)\}$, lorsque le message du troisième est correct.

$\bar{N_2}$ correspond aux échanges à partir de l'envoi correct du nœud "2". Nous le déterminons par la suite.

Pour le troisième nœud qui s'est réveillé T_{msg} plus tard, on obtient :

$\bar{T_3} = T_{msg}\{\bar{N_1} + 2(2\bar{N_2} - 1)\} - T_{msg}$

Pour le nœud $k+1$:

Par récurrence imédiate, il vient :

$\bar{T_k} = \bar{T_1} + 2(k-1)(\bar{N_2} - 1)T_{msg}$

Nous écrivons alors l'espérance de la durée d'activité d'un capteur :

$\mathbb{E}[T] = \bar{T_1} + 2(\bar{N_2} - 1)T_{msg}\{\frac{1}{N}\sum_{k=2}^{N}(k-1)\}$

$\mathbb{E}[T] = \bar{T_1} + (\bar{N_2} - 1)(N-1)T_{msg}$

d'où :

$$\mathbb{E}[T] = T_{msg}\{\bar{N_1} + (\bar{N_2} - 1)(N-1)\} \tag{4.13}$$

et l'énergie moyenne consommée est :

$$\bar{E''} = E_{Rx,msg}\{\bar{N_1} + (\bar{N_2} - 1)(N-1)\} \tag{4.14}$$

Calcul du nombre moyen de transmissions $\bar{N_1}$:

Soient $\bar{\tau}$ la probabilité qu'un message `MSG` soit correct et $\bar{\tau} = 1 - \tau$. θ le nombre maximum de transmissions. Nous calculons alors les probabilités suivantes :

$Pr[N_1 = 2] = \bar{\tau}^2$

$Pr[N_1 = 4] = \tau\bar{\tau}^2 + \bar{\tau}\tau\bar{\tau} = 2\bar{\tau}^2\tau$ (cf. figure 4.16)

$Pr[N_1 = 6] = \bar{\tau}\tau^2\bar{\tau} + \tau\bar{\tau}\tau\bar{\tau} + \tau\tau\bar{\tau}^2 = 3\bar{\tau}^2\tau^2$

$\vdots$

$Pr[N_1 = 2(\theta-1)] = \bar{\tau}\tau^{(\theta-1)}\bar{\tau} + \tau\bar{\tau}\tau^{\theta-3}\bar{\tau} + \cdots + \tau^{\theta-2}\bar{\tau}\bar{\tau} = (\theta-1)\bar{\tau}^2\tau^{\theta-2}$

$Pr[N_1 = 2\theta] = \bar{\tau}\tau^{\theta-1} + \tau\bar{\tau}\tau^{\theta-2} + \cdots + \tau^{\theta-1}\bar{\tau} + \tau^{\theta} = \theta\bar{\tau}\tau^{\theta-1} + \tau^{\theta}$

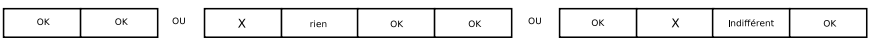


FIG. 4.16 – Exemple de calcul de probabilité $Pr[N_1 = 4]$.

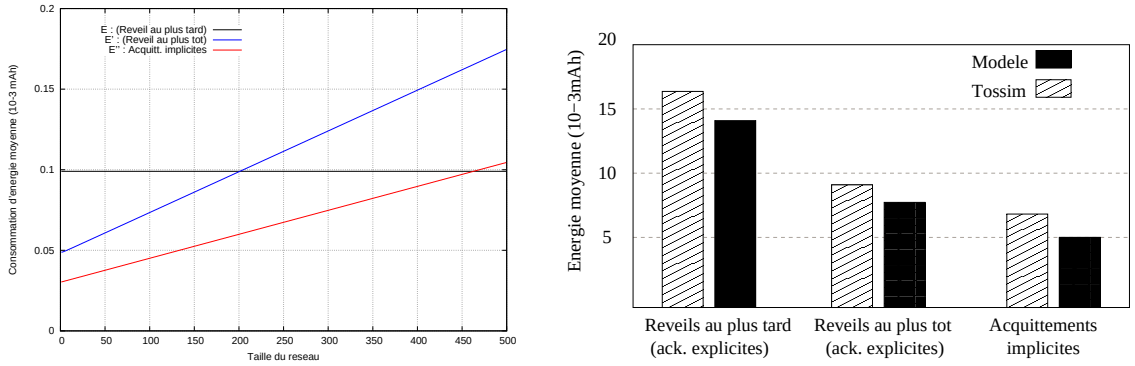
L'espérance de $\bar{N_1}$ vaut :

$$\mathbb{E}[N_1] = 2\bar{\tau}^2\Big[\sum_{k=0}^{\theta-2}(k+1)^2\tau^k\Big] + 2\theta^2\bar{\tau}\tau^{\theta-1} + 2\theta\tau^\theta \tag{4.15}$$

Après simplification, nous trouvons que :

$$\bar{N_1} = \frac{2}{\bar{\tau}}\Big(1+\tau-\theta^2\tau^{\theta-1}+(2\theta^2-2\theta-1)\tau^\theta-(\theta-1)^2\tau^{\theta+1}\Big) + 2\theta^2\bar{\tau}\tau^{\theta-1} + 2\theta\tau^\theta \tag{4.16}$$

$\bar{N_2}$ est le nombre de retransmissions des autres nœuds, nous l'écrivons comme suit :
$\bar{N_2} = \frac{1-\bar{\gamma}^\theta}{\gamma}$ avec $\gamma = \bar{\tau}_{msg}$



(a) (b)

FIG. 4.17 – À gauche - Comparaison analytique entre $\bar{E}$, $\bar{E}'$ et $\bar{E}''$. À droite - Comparaison des résultats des trois modèles avec les résultats de Tossim.

Nous avons comparé analytiquement les trois régimes proposés (réveils au plus tard, réveils au plus tôt et régime avec acquittements implicites) en terme de consommation d'énergie moyenne par nœud. Les résultats tracés dans la figure 4.17(a) font ressortir, dans un premier temps, un net avantage en faveur du régime avec des réveils au plus tôt. En effet, cette solution est plus performante jusqu'à environ 200 capteurs. Cela est dû aux réveils moins espacés des nœuds ($T = T_{msg} + T_{ack}$ pour le régime avec des réveils au plus tôt et $3 \times T$ pour le régime avec des réveils au plus tard). Nous rajoutons à cela le taux d'erreur relativement faible (1 %) qui fait que le nombre moyen de transmissions est ~ 1.02. En revanche, sur des réseaux de grande taille, une occurence d'une ou plusieurs erreurs, dans le régime avec des réveils au plus tôt, augmente considérablement le temps moyen d'attente $\bar{W}$, ce qui influe sur la consommation d'énergie. En outre, le régime avec les acquittements implicites s'avère encore plus performant car l'espacement des temps de réveils est réduit à T_{msg} i.e., un gain de temps de $2 \times T_{ack}$ sur la période pendant laquelle le nœud est actif.

Nous avons également évalué les trois régimes en terme de consommation d'énergie en utilisant le simulateur à événements discrets TOSSIM. C'est un outil fourni dans TinyOS[6] [TOS01]. Nous l'avons choisi pour plusieurs raisons : il exécute des implantations réelles sous TinyOS ; il permet l'expérimentation d'un grand nombre de nœuds ; il gère avec précision le comportement de TinyOS jusqu'au bas niveau (par exemple, les interruptions d'horloge) ; il modélise le CSMA/CA de la couche MAC. Par conséquent, les interférences et les collisions sont comptabilisés. Cette évaluation donne un résultat très réaliste des protocoles évalués. La consommation électrique est calculée en utilisant PowerTOSSIM[7] [SHC+04]. Les paramètres de simulation de la durée des messages et l'intensité du courant électrique sont énumérés dans le tableau (Tab. 4.1).

La figure 4.17(b) montre la consommation d'énergie moyenne d'un nœud selon les trois régimes proposés sur 144 *cycles* (i.e., un cycle toutes les 10 *minutes* pendant une journée). Les résultats du modèle appuient les conclusions dans la figure 4.17(a) avec un gain d'énergie de 29 % pour le régime avec les réveils au plus tôt et un gain du 75 % pour le régime avec des acquittements implicites. Les intervalles de confiance dans les résultats de Tossim sont inférieurs à 3 %. Nous remarquons une légère différence entre les résultats du modèle analytique et ceux du simulateur TOSSIM. Cette différence correspond à l'énergie consommée lors des transitions entre les modes de fonctionnement de la radio et lors du traitement des messages, qui n'est pas prise en compte dans le modèle. Cela est plus significatif pour le premier régime où la différence est de 12 % en raison du nombre important de transitions (pendant une durée d'activité, il y a au moins deux `MSG` et deux `MSG-ACK`).

4.5.3.3 Répartition de la consommation d'énergie entre les différents protocoles

À présent, que consomment réellement nos protocoles en terme d'énergie ? Et que représente cette consommation par rapport à une activité journalière d'un capteur ?

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi le scénario de simulation suivant : Un réseau de capteurs fonctionnera pendant une journée complète de 24 *heures*. Les nœuds commencent par une phase d'initialisation, restent en régime permanent le reste du temps et assurent également une mesure de température toutes les 10 *minutes*. Pour la mesure de température nous avons considéré une valeur typique du transducteur de température "LM 335" (1 mA pendant 0.1 s).

La figure 4.18 illuste la répartition des consommations électriques moyennes d'un capteur selon les

[6] TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour des réseaux de capteurs sans-fil.

[7] PowerTOSSIM est profiler d'énergie, il permet d'estimer la consommation d'énergie de chaque nœud du réseau en tenant compte de tout mode de fonctionnement y compris les transition entre les modes. Il supporte également plusieurs modèles de consommation suivant la plates-formes utilisée.

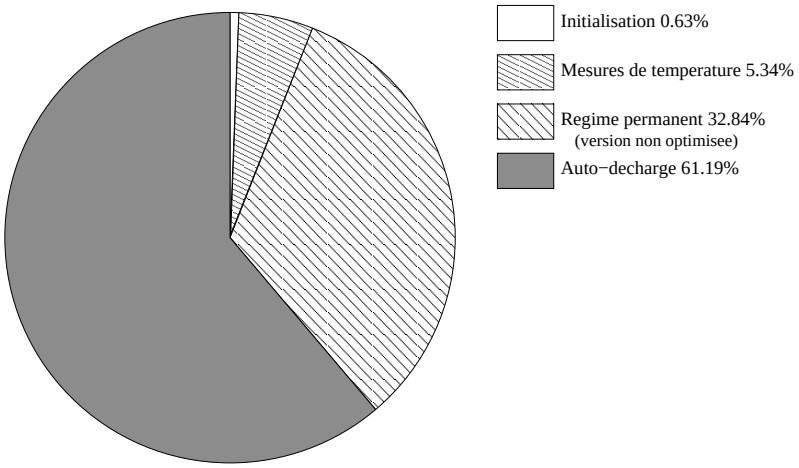


FIG. 4.18 – Répartition de la consommation d'énergie.

différentes phases : initialisation, régime permanent, mesures de température. Nous avons également tenu compte du phénomène d'auto-décharge de la batterie (0.01 % *par jour*). Dans un premier temps, nous observons que la solution proposée consomment très peu d'énergie. La partie communication (initialisation et régime permanent) ne représente finalement qu'un tiers de la consommation journalière du capteur. Ensuite, les mesures de température représentent 5.34 % de la consommation. Enfin, le phénomène d'autodécharge des piles constitue l'essentiel de la dissipation d'énergie (61.19 %).

4.6 Implantation et tests

PLACIDE a été implantée par *HLP Technologies*[8] (un de nos partenaires dans le projet Capteurs) sur des capteurs Tmotesky munis du Chipcon CC2420 qui est conforme à la norme IEEE 802.15.4. Chaque nœud est alimenté par deux piles alcalines AA. Les capteurs ont été placés dans des palettes. Au total, 21 palettes ont été équipées, et stockées dans un entrepôt frigorifique pendant 48 h, puis transportées dans un véhicule frigorifique, afin de simuler une véritable expédition. Ensuite, un ordinateur portable a été utilisé comme récepteur, pour communiquer avec les nœuds.

Ces expérimentations ont permis de tester la formation du cycle avec la phase d'initialisation, puis le régime permanent et l'enregistrement des mesures de température ainsi que la notification des alarmes (dépassement du seuil de température). Une rupture de la chaîne du froid a été simulée en plaçant un capteur à l'extérieur de l'enceinte de refroidissement du véhicule. L'incident a été détecté et enregistré puis il a été vérifié que cette alarme a été bien notifiée dans la base de données de chaque nœud.

[8] www.hlp.fr

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une solution protocolaire « Placide » pour des réseaux de capteurs de petite taille destinés au suivi de la chaîne du froid. De part les spécificités qu'impose ce contexte applicatif et les besoins exprimés par ses utilisateurs, la solution se doit d'être auto-organsante, facile à déployer, performante et très économe en énergie.

La solution retenue consiste alors à organiser les communications sous forme de liste doublement chaînée. Son originalité première est de proposer une architecture sans infrastructure et sans station de base. Pour celà nous avons proposé deux protocoles majeurs. Un protocole d'initialisation permet de synchroniser les nœuds et de construire une chaîne. Ensuite, un protocole du régime permanent consiste à conserver le synchronisme entre les nœuds-capteurs pour qu'ils se réveillent les uns après les autres afin de transférer leurs alarmes de température et confirmer leur présence dans le cycle. En outre, nous avons conçu d'autres protocoles pour le maintien et la robustesse de la topologie, notamment pour l'ajout et le traitement des disparitions de nœuds.

Étant donné que l'énergie est une ressource critique et que c'est la partie communication qui consomme le plus d'énergie dans le contexte applicatif choisi, nous avons donc opté pour une approche de conservation d'énergie centrée sur la minimisation du *duty-cycle*. Afin d'atteindre cet objectif les protocoles de niveau applicatif sont fondés sur un mécanisme d'ordonnancement *sleep/wakeup* utilisant des rendez-vous planifiés. Ainsi, nous garantissons un faible *duty-cycle* puisque chaque nœud maintient sa radio éteinte la plupart du temps. En plus de la consommation d'énergie très réduite car les nœuds-capteurs sont en sommeil la plupart du temps, les protocoles tiennent également compte des sources de surconsommation. Par exemple, dans la phase d'initialisation le nombre de collisions est contrôlé grâce à une temporisation aléatoire pendant laquelle chaque nœud écoute le canal avant d'émettre.

Dans la deuxième partie de ce travail nous avons étudié en détail les performances des protocoles grâce à des modèles analytiques que nous avons présentés. Après avoir évalué leur performance, nous avons dimensionné leurs paramètres afin d'améliorer encore la robustesse et l'efficacité énergétique. La première étape consistait à choisir la meilleure temporisation durant la phase d'initialisation, offrant un bon compromis entre le nombre de collisions, la robustesse de la chaîne et la consommation moyenne d'énergie. Dans la seconde étape, des améliorations de performances en terme de consommation d'énergie ont été apportées pour le régime permanent. Nous avons donc proposé un deuxième régime avec des réveils au plus tôt évitant que les périodes d'activité des nœuds soient inutilement longues car pendant ces périodes là, la radio consomme de l'énergie en raison de l'écoute à vide. Le troisième régime permanent proposées s'inspire des paradigmes de l'auto-organisation qui consistent à utiliser une coordination implicite. Dans celui-ci, nous avons supprimé les acquittements explicites et laissé

l'overhearing faire office d'accusé de réception. Ces améliorations apportées au régime permanent ont engendré des gain d'énergie important.

Finalement, les modèles analytiques développés nous ont permis de dimensionner efficacement les protocoles. Par ailleurs, ces modèles ont été également appuyés par une série de simulations montrant leur efficacité d'une part et les performances de la solution « Placide » en terme d'économie d'énergie d'autre part. En l'état, « Placide » est une solution auto-organisante, efficace en énergie et facile à déployer. De plus, des expérimentations en laboratoire ont montré qu'il existe d'autres contextes applicatif auxquels elle peut s'adapter tels la domotique par exemple.

La prochaine phase de notre travail va consister à étudier des déploiements réels de réseaux de capteurs. Nous allons étudier des questions liées à la qualité du lien dans les réseaux de capteurs sans fil afin d'étayer certaines hypothèse de la solution « Placide » et amorcer une nouvelle problématique de recherche.

Chapitre 5

Étude expérimentale sur la qualité du lien

Sommaire

5.1 Introduction . . . 65
5.2 Problématique et état de l'art . . . 66
5.3 La qualité du lien . . . 67
5.3.1 Le *chipcon CC2420* . . . 68
5.3.2 Tests préliminaires . . . 69
5.4 Expérimentations sur des réseaux de plusieurs nœuds . . . 72
5.4.1 Mise en œuvre des expérimentations . . . 72
5.5 Analyse et observations . . . 75
5.5.1 Évolution en fonction du temps . . . 75
5.5.2 Impact de la position de la Station de Base . . . 76
5.5.3 Impact d'une puissance d'émission forte de la Station de Base . . . 77
5.5.4 Impact des différents niveaux de puissance dans le cas d'un réseau hétérogène . . . 79
5.6 Conclusion . . . 82

5.1 Introduction

Dans toute conception de protocole ou de modèle analytique pour les réseaux de capteurs sans fils, nous posons des hypothèses plus ou moins fortes afin d'assouplir l'analyse des performances. Cependant, l'amélioration des performances et un dimensionnement réaliste des protocoles passent par un étayage de ces hypothèses grâce à un déploiement expérimental. En effet, l'expérimentation réelle permet d'affiner les solutions proposées, de découvrir d'autres aléas du monde physique dont il faut tenir compte et surtout ouvrir d'autres pistes de recherche.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale sur la qualité du lien sans fil (*LQI* pour *Link Quality Indicator*). Nous mettons en évidence les effets des spécificités topologiques sur les solutions réseaux déployées.

En utilisant des capteurs *Tmote Sky* de *Moteiv* [Tmo06], nous avons déployé l'algorithme *multiHopLQI* [TML04] de *TinyOS* [TOS01] dans différentes configurations de réseau : homogènes et hétérogènes ; topologie linéaire ou en grille ; en faisant varier la puissance d'émission et la distance entre les nœuds. Les résultats de ces observations peuvent servir à affiner les modèles déjà proposés dans la littérature, ainsi qu'à mener à bien des paramétrages ou des ajustements de protocoles.

Nous étudions, en premier lieu, la variation de la qualité du lien dans le temps et essayons de comprendre la relation entre le niveau de la puissance d'émission, la distance et la qualité du lien. Nous présentons également l'impact de certaines perturbations dues à des phénomènes externes (physiques) ou internes (mouvement des nœuds, variation de la puissance) sur la dynamique du réseau. Par la suite, nous nous intéressons à l'impact et aux effets secondaires de la position et de la puissance d'émission de certains nœuds importants du réseau, comme la station de base, dans ce genre d'algorithmes fondés sur le *LQI*.

Les capteurs ne connaissent pas la position géographique exacte des autres nœuds. La détermination du nœud le plus proche et le plus éloigné dépend de la qualité du signal reçu ou dans le cas de nos expérimentations de l'indicateur de la qualité du lien. Pour chaque paquet reçu cette valeur est « retournée » par le module radio Chipcon *CC2420* [CC00] fourni dans la majorité des plates-formes commerciales, notamment le *Tmote Sky* de *Moteiv* [Tmo06] que nous avons utilisé dans cette étude.

Les valeurs du *LQI* sont normalement comprises entre 50 et 110. Plus la valeur est grande, meilleure est la qualité du lien entre les deux nœuds dont il est question. Par conséquent, dans ces capteurs, si le *LQI* entre deux nœuds est au-dessus d'un seuil donné, ils peuvent communiquer directement, en tenant compte de l'ensemble de la topologie du réseau. Dans cette étude, nous considérons des scénarios (présentés dans la section suivante) où un nœud calcule la qualité de ses liens avec ses trois meilleurs voisins et construit ainsi sa table de voisinage en tenant compte également du nombre de sauts (distance) vers la Station de Base (ou *BS* pour *Base Station*). Le choix du prochain saut (voisin) dépend de l'estimation du coût du lien afin d'atteindre la Station de Base.

5.2 Problématique et état de l'art

Ces dernières années témoignent de l'énorme bond en avant dans le domaine des réseaux de capteurs. Les chercheurs tentent en particulier d'exploiter tous les paramètres disponibles afin d'améliorer les

performances des solutions, des protocoles et des algorithmes proposés.

Dans [GSSI07], les auteurs présentent une métrique de routage fondée sur la qualité du lien et tenant compte des ressources pour des réseaux de capteurs et d'actionneurs afin de s'adapter aux conditions variables du support sans fil dans de tels réseaux hétérogènes.

Dans le domaine de la localisation, Blumenthal *et al.* utilisent le *LQI* pour estimer la distance entre un nœud et certains points de référence [BGGT07].

Récemment, l'analyse expérimentale est devenue un sujet de premier plan dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. Certaines études [WLFH07], [LMH+03], [SKH06], [SDTL06] et [ZG03] ont montré récemment que dans un déploiement réel de réseaux de capteurs, la qualité du lien varie dans l'espace et le temps. Dans [LMH+03], les auteurs étudient les problèmes de performances liés à la position des nœuds, aux taux de paquets reçus et à la distance entre les nœuds. Dans [WLFH07], Wahba *et al.* ont utilisé deux capteurs pour évaluer la qualité du lien en fonction, à la fois, de la distance entre les nœuds et du niveau de puissance d'émission.

Polastre *et al.* [PSC05] ont présenté les résultats d'une évaluation préliminaire du mote[1] Telos (muni du module radio *CC2420*) et ont suggéré que la moyenne *LQI* est le meilleur indicateur du taux de paquets reçu (PRR pour *Packet Reception Rate*). Dans leur travail, les auteurs ont tenu compte de l'homogénéité de leur réseau, et tous les nœuds ont la même puissance d'émission.

L'aspect intéressant dans tout réseau de capteurs est la puissance d'émission du capteur qui constitue un élément majeur de la consommation d'énergie. Une puissance d'émission élevée conduit à une meilleure qualité du signal sur une grande portée. En revanche, elle augmente la consommation d'énergie et vice-versa.

Une raison suffisante pour que nous nous intéressions à la qualité du lien est de répondre aux questions suivantes : *Est-ce que ce paramètre varie dans le temps ? Quels sont les facteurs de cette variation ? Comment le LQI dépend-il de la puissance d'émission et de la distance entre les nœuds ?* Et enfin, *quel est son impact sur le routage, la topologie et la durée de vie du réseau ?*

5.3 La qualité du lien

Dans ce paragraphe, nous introduisons le paramètre *LQI*. La mesure *LQI* est une caractérisation de la puissance et/ou de la qualité d'un paquet reçu [IEE03]. Elle peut être mise en œuvre en utilisant le

[1] C'est un nom anglais qui désigne quelque chose, de la poussière particulièrement, qui est si petit qu'il est presque impossible de voir.

"Receiver ED"[2], une estimation du rapport signal sur bruit ou bien une combinaison des deux méthodes. L'utilisation de cette mesure dans les couches réseau et application n'a pas encore été spécifiée dans le Standard IEEE-802.15.4.

La mesure du *LQI* doit être effectuée pour chaque paquet reçu, et le résultat doit être signalé à la couche MAC en utilisant la primitive *PD-DATA.indication* comme un entier allant de 0 à 255 (voir le paragraphe 6.2.1.3 dans [IEE03]).

Le minimum et le maximum des valeurs du *LQI* (0 et 255) devraient être associés à la plus basse et la plus haute qualité des signaux détectables par le récepteur. Les valeurs *LQI* doivent être uniformément réparties entre ces deux limites. Par la suite nous verrons que cela dépend vraiment du type de récepteur utilisé, notamment celui du module radio *CC2420* [CC00] où ces deux limites sont en fait 50 et 110.

De nombreuses plates-formes, par exemple le micaZ, Telos, et Intel Mote2 utilisent, à l'heure actuelle le même module radio, le *CC2420*.

En plus du *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*, le *CC2420* fournit un indicateur *hardware* supplémentaire, le *LQI*, qui est en fait une mesure du taux d'erreur binaire effectuée par le module. Les limites observées[3] sur le *RSSI* dans les anciennes plates-formes ont amené plusieurs couches de routage [TC05, TML04] à adopter le *LQI* comme indicateur privilégié.

À notre connaissance et malgré son adoption à grande échelle, il n'a jusqu'à présent fait l'objet que de peu d'évaluations afin de vérifier s'il constituait réellement un bon indicateur. Par ailleurs, d'autres équipes de recherche résistent et défendent toujours le bon vieux paramètre *RSSI* [SL06].

Les résultats dans [SL06] indiquent en outre que le *RSSI* est fortement corrélé avec le *PRR*, sauf lors d'un fonctionnement aux limites de sensibilité du récepteur. Le *LQI* quant à lui, peut faire des estimations plus précises, nécessitant en moyenne de nombreuses lectures, ce qui diminue la flexibilité et augmente les coûts de l'estimation. Les résultats dans [SL06] suggèrent qu'il existe une décorrélation entre le comportement des indicateurs hardware et les protocoles qui les utilisent.

5.3.1 Le *chipcon CC2420*

Le *CC2420* opère dans la bande *ISM* $2,4$ *GHz* avec un débit effectif de 256 *Kbit/s*, débit beaucoup plus élevé que celui des anciennes radios. Dans la bande $2,4$ *GHz*, il dispose de 16 canaux (numérotés

[2] *Receiver Energy Detection* est une mesure destinée à être utilisée par la couche réseau dans le cadre d'un algorithme de sélection de canaux. Il s'agit d'une estimation de la puissance du signal reçu à l'intérieur de la bande passante du canal.

[3] Les radios dont sont dotées les anciennes plates-formes présentent des problèmes d'étalonnage ou de calibrage. Ces problèmes font que les mesures du RSSI, aux seuils de sensibilité du récepteur radio, ne sont pas aussi prédictives sur le *PRR* que les mesures du *LQI*.

de 11 à 26). Chaque canal occupe 3 *MHz* avec des fréquence centrales espacées de 5 *MHz*. Le *CC2420* utilise un schéma de codage qui encode 32 chips pour un symbole de 4 *bits*. Ces données codées sont alors modulées selon l'*OQPSK* (Offset Quadrature Phase Shift Keying).

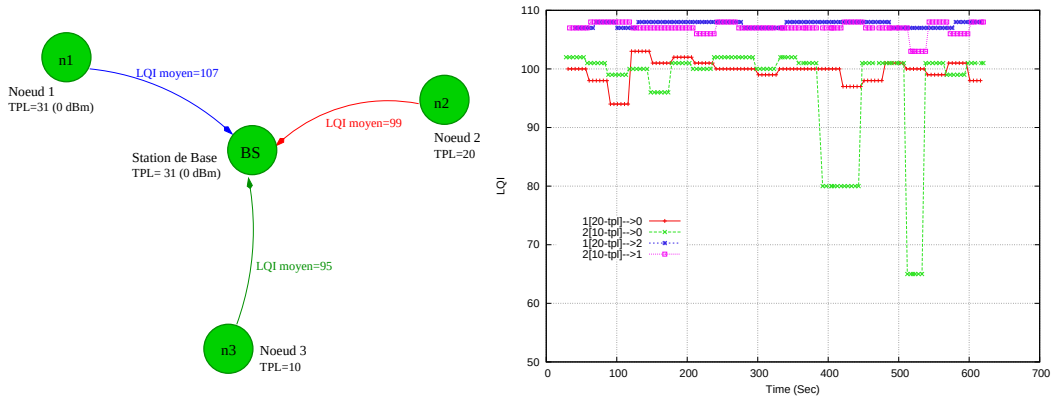
Le *CC2420* fournit deux mesures utiles : *RSSI* et *LQI*. Le *RSSI* est l'estimation de la puissance du signal reçu. Elle est calculée sur 8 périodes de symbole et enregistrée dans le registre *RSSI_VAL*. Chipcon précise la formule suivante, pour calculer la puissance du signal reçu (P) en *dBm* :

$P = RSSI_VAL + RSSI_OFFSET$,

où $RSSI_OFFSET$ est d'environ -45. Le *LQI* peut être considéré comme un taux d'erreur observé par la puce, il est calculé sur les 8 bits suivant le délimiteur de début de trame (*SFD* pour *Start Frame Delimiter*). Les valeurs du *LQI* sont en général comprises entre 110 et 50, correspondant respectivement à la qualité maximale et minimale des trames.

5.3.2 Tests préliminaires

Avant de procéder au déploiement d'un réseau de plusieurs nœuds, nous avons mis en œuvre des tests afin de comprendre la qualité du lien entre deux nœuds et de montrer comment varie ce paramètre en fonction de la distance entre les nœuds et de la puissance d'émission de chacun.



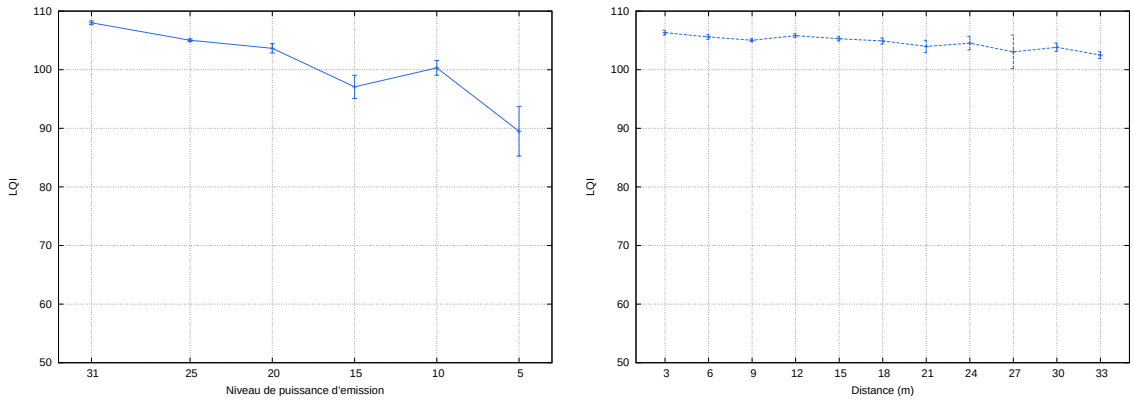
(a) (b)

FIG. 5.1 – À gauche - Réseau de capteurs avec trois nœuds et la qualité du lien entre eux. À droite - Qualité du lien entre les nœuds en fonction du temps.

Le premier test illustré dans la figure 5.1(a) met en jeu trois nœuds-capteurs et une Station de Base pour collecter les paquets. Les nœuds forment ainsi une topologie en étoile et chacun des nœuds-capteurs est placé à $3m$ de la Station de Base. Les nœuds-capteurs utilisent 3 niveaux de puissance d'émission, TPL=31, TPL=20 et TPL=20 *(TPL* pour T*ransmission Power Level)*. En fait, le software

du matériel que nous utilisons ne permet pas de manipuler directement les puissances en dBm, d'où la notion de niveau qui est un entier compris entre 1 et 31 correspondant respectivement à $-25dBm$ et $0dBm$ qui sont les puissances d'émission minimale et maximale. La figure 5.1(b) montre la variation du LQI dans le temps entre les trois nœuds et la Station de Base. Dans un premier temps nous remarquons que le LQI dépend de la puissance de l'émetteur. En effet, plus la puissance de l'émetteur est forte, meilleure est le LQI mesuré. Si l'on considère les paquets reçus au niveau de la Station de Base, on trouve qu'en moyenne le lien entre le nœud *"1"* et la BS est légèrement supérieur que celui entre le nœud *"2"* et la BS qui à son tour est meilleur que celui entre le nœud *"3"* et la BS.

Dans le deuxième test, on enlève deux nœuds-capteurs et on fait varier la puissance d'émission de l'autre afin de d'étudier la variation du LQI en fonction de la puissance d'émission. Le nœud-capteur placé à une distance de $3m$ émet un paquet de 40 octets toutes les 3 secondes. La Station de Base reçoit ces paquets et mesure la qualité du lien correspondante. Les deux nœuds sont placés dans un couloir d'une température ambiante de $20°C$. Ce test est réalisé avec 6 niveaux de puissance d'émission différents, entre 5 et 31.



(a) (b)

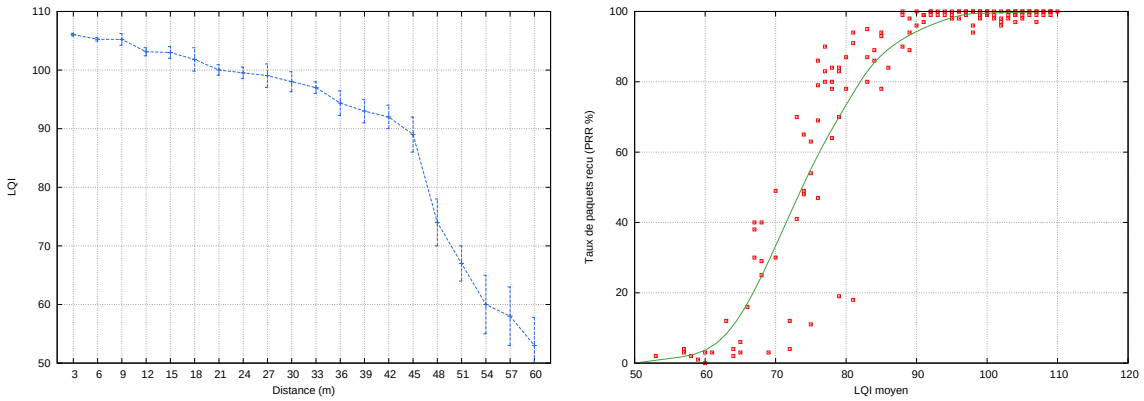
FIG. 5.2 – À gauche - Qualité du lien en fonction de la puissance d'émission. À droite - Qualité du lien en fonction de la distance.

Dans la figure 5.2(a), on constate bien que moins le nœud émet fort, plus la qualité « moyenne » du lien entre lui et la Station de Base sera faible. Pour chaque niveau de puissance d'émission, le nœud transmet 1000 paquets. Le LQI moyen des paquets reçus au niveau de la Station de Base passe finalement de 109 avec un TPL de 31 à 89 pour un TPL de 5.

Le troisième test que nous avons réalisé a pour but de montrer la variation du LQI en fonction de la distance. Nous avons utilisé un nœud-capteur et une Station de Base. Le nœud-capteur placé à

différentes distances, allant de 3 et 33 mètres, émet un paquet de 40 octets toutes les 3 secondes. La Station de Base reçoit ces paquets et mesure la qualité du lien correspondante. Les deux nœuds sont placés dans un couloir d'une température ambiante de 20°C.

Dans la figure 5.2(b), nous avons tracé le LQI moyen de chaque série de 1000 paquets en fonction de la distance entre le nœud-capteur et la Station de Base. Nous avons également remarqué, dans ce test, une variation de la moyenne du LQI en fonction de la distance. Même si cette variation est faible en raison de la distance maximale considérée (c'est toute la longueur du couloir), on constate que généralement le LQI moyen baisse lorsque le nœud émet de plus loin.



(a) (b)

FIG. 5.3 – À gauche - Qualité du lien en fonction de la distance à l'extérieur avec une puissance d'émission de $0dBm$. À droite - Taux de paquets reçu en fonction du LQI moyen.

Le dernier test préliminaire consiste à mesurer la qualité du lien dans un environnement extérieur. Les expérimentations ont été faites en plein air dans un stade. Nous avons utilisé un nœud-capteur émettant à une puissance maximale ($0dBm$) et nous avons fait varier la distance entre lui et la Station de Base. Nous avons tracé la courbe des mesures dans 5.3(a). Nous remarquons, dans ce test également, que la qualité du lien diminue en fonction de la distance. Par ailleurs, nous avons observé que pour les mêmes distances considérées, la qualité du lien s'atténue un peu plus à l'extérieur qu'à l'intérieur. Nous pensons que cela est dû à la propagation guidée dans le couloir. On peut rajouter à cela les différentes conditions des deux environnements ainsi que les phénomènes de dispersion et de réflexion.

Jusqu'à présent, nous nous sommes penchés sur la grande variation de la qualité du lien dans le temps, en fonction de la puissance d'émission et de la distance entre les nœuds. En outre, on peut constater que jusqu'à certaines distances ou certains niveaux de puissance on a toujours une valeur du LQI raisonnablement proche de la valeur maximale. Une analyse supplémentaire des mesures a montré

que si l'on considère les valeurs moyennes du *LQI*, le taux de paquets reçus *(PRR)* correspondant suit une courbe lisse suggérant une meilleure corrélation entre les deux. Les résultats sont tracés dans la figure 5.3(b), et le coefficient de corrélation (coefficient de *Pearson*) est de 0.87. En revanche, dans certains cas une valeur de *LQI* par exemple de 85, pourrait se traduire par une valeur quelconque du *PRR* entre 10% et 100%. Bien que nous n'ayons pas complètement compris ce qui peut provoquer cela, nous pensons que cela peut être lié à des changements de l'environnement et des interférences avec d'autres types de réseaux tels que le 802.11.

5.4 Expérimentations sur des réseaux de plusieurs nœuds

Dans cette partie, nous nous proposons d'étudier la qualité du lien dans des réseaux de plusieurs nœuds. Nous analysons son impact sur la topologie du réseau et nous essayons de comprendre comment certains aspects fondamentaux de déploiement peuvent influencer le réseau de capteurs dans sa totalité.

5.4.1 Mise en œuvre des expérimentations

Nous avons conduit 40 expériences[4] et enregistré les observations pour plus de 800 minutes de mesures par capteur. Tous ces scénarios diffèrent par le nombre de nœuds, la distance entre les nœuds, leur niveau de puissance d'émission, la puissance d'émission de la Station de Base et finalement par la topologie déployée, notamment, une topologie en ligne droite et une topologie sous forme de grille uniforme (Fig. 5.4). Tous les scénarios sont testés à l'intérieur d'un bâtiment. Les expérimentations sont menées avec plusieurs niveaux de puissance de transmission.

En fait, tous ces scénarios nous ont aidés à comparer plusieurs configurations pertinentes pour un réseau de capteurs donné. Nous avons commencé par une simple topologie en ligne droite, et nous avons observé le réseau en fonction du temps, de leur positionnement, de la connectivité, etc. Nous avons ensuite repris ces observations avec l'ajout de nœud redondant dans le réseau dans le cas de topologie en grille.

5.4.1.1 La plate-forme utilisée

Le capteur *Tmote Sky* (Fig. 5.5) est une petite plate-forme qui inclut un micro-contrôleur opérant à $8MHz$, $48Ko$ de ROM, $10Ko$ de RAM, un transmetteur sans fil *ZigBee* opérant à $2.4GHz$ et une interface *USB* pour la programmation du capteur. Chaque capteur est doté d'une batterie de type

[4] La série d'expérimentations suivantes (section 5.4) a été conduite conjointement avec nos collègues de l'équipe ARMOR de Telecom-SudParis.

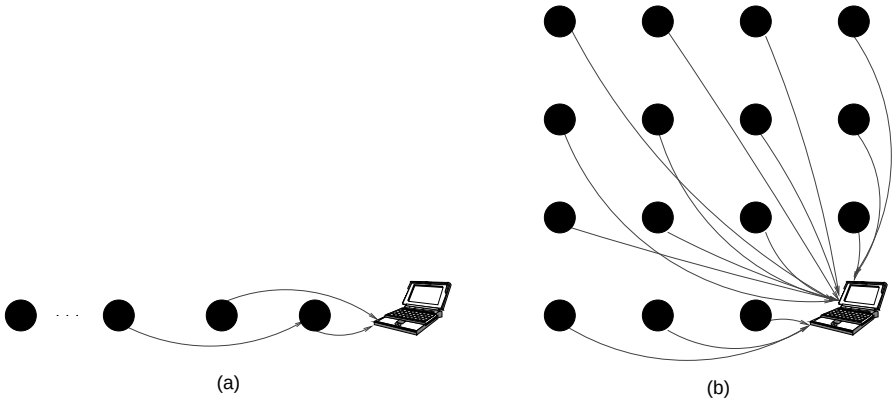


FIG. 5.4 – À gauche - Topologie linéaire. À droite- Topologie sous forme de grille uniforme.

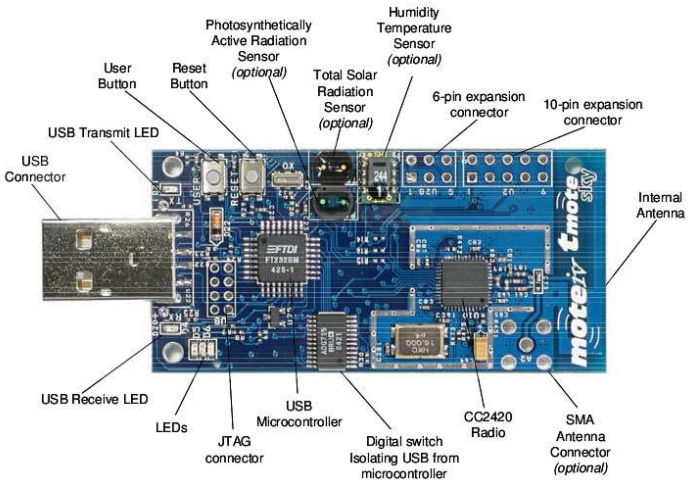


FIG. 5.5 – Un capteur *"Tmote Sky"*.

AA. *Tmote Sky* fournit le moyen de paramétrer sa puissance d'émission. Ce paramètre varie entre 1 ($-25dBm$, la puissance minimale) jusqu'à 31 ($0dBm$, la puissance maximale).

Par conséquent, il suffit de faire varier le paramètre *TPL* (*Transmission Power Level*), la puissance d'émission est alors augmentée ou diminuée. Dans tous les scénarios, nous avons utilisé uniquement les antennes imprimées sur les capteurs (sans antenne externe). En outre, tous les capteurs sont placés sur le sol.

Les différents scénarios de déploiement, résumés dans la Table 5.1 sont fondés sur les hypothèses suivantes :

– Généralement, les capteurs ont des antennes radios de qualité faible. En effet, les capteurs ont à la base une antenne imprimée sur leur carte et on ne les a pas équipés d'antenne externe ;

– Le déploiement dans un environement stable (conditions invariables) n'est pas possible.

5.5 Analyse et observations

Dans les scénarios *"1"* à *"29"* (Tab. 5.1), les nœuds sont placés dans un couloir d'environ $2m$ de large en ligne droite et en visibilité directe le long du mur. Par ailleurs, c'est un endroit ouvert au public et qui a connu des mouvements fréquents de personnes durant les expérimentations.



(a) (b)

FIG. 5.6 – Environnements du déploiement. À gauche - Un couloir de $35m$ de long. À droite - Une cour en plein air de 30x30m.

Dans ces scénarios, nous avons fait varier le nombre de nœuds (respectivement, 12, 7 et 5 y compris la Station de Base). Ils sont séparés de 3, 6 et 9 mètres respectivement. Pour chaque série de paramètres ci-dessus, nous avons utilisé deux séries différentes de niveau de puissance d'émission, notamment, SetMax$\{31\}$ et SetLow$\{25, 20, 15, 10, 5\}$.

5.5.1 Évolution en fonction du temps

La qualité du canal est dynamique pour un réseau donné, c'est à dire, non seulement elle est affectée par la batterie limitée des capteurs, mais aussi par des changements aléatoires dans les propriétés physiques du canal. Par exemple, un groupe de personnes qui passe peut facilement changer la dynamique du réseau. Sur la figure 5.7, nous envisageons de résumer ces effets, et discutons le 1er scénario. À chaque fois qu'il y a eu des mouvements de personnes autour du réseau, nous avons remarqué des problèmes de connectivité.

Les chutes qui sont présentées dans la Figure 5.7, représentent la déterioration du canal de communication. En outre, les autres fluctuations des courbes représentent les changements de la connectivité

TAB. 5.1 – Description des scénarios

Scenario	Nombre de Nœuds	TPL_{SB}	TPL_{Nud}	Distance *(m)*
1	12	31	25	3
2	7	31	25	6
3	7	25	25	6
4	5	25	25	9
5	5	31	25	9
6	12	31	20	3
7	12	20	20	3
8	7	31	20	6
9	7	20	20	6
10	5	20	20	9
11	5	31	20	9
12	12	31	15	3
13	12	15	15	3
14	7	15	15	6
15	5	15	15	9
16	5	31	15	9
17	7	31	15	6
18	12	31	10	3
19	12	10	10	3
20	7	31	10	6
21	7	10	10	6
22	5	31	10	9
23	5	10	10	9
24	12	31	5	3
25	12	5	5	3
26	7	31	5	6
27	7	5	5	6
28	5	31	5	9
29	5	5	5	9

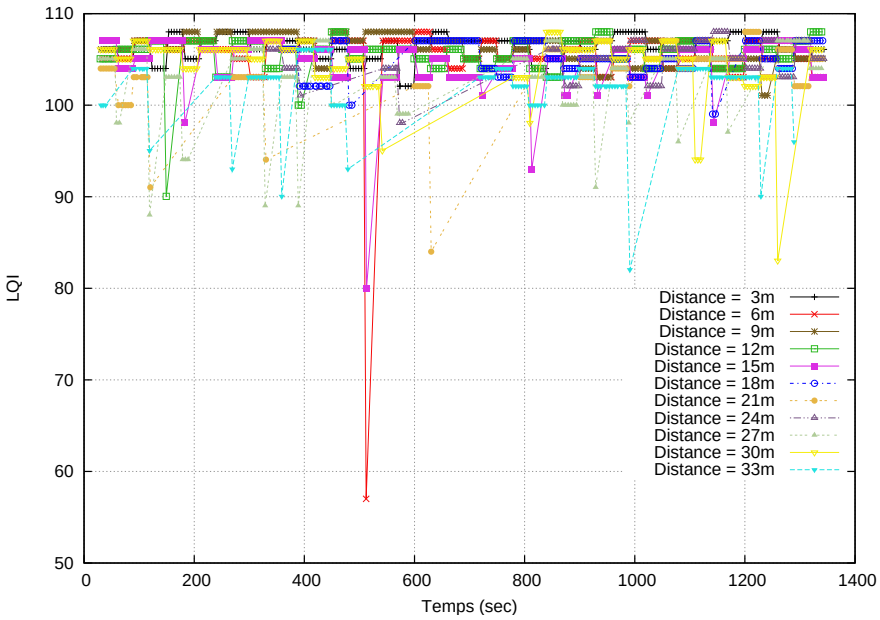


FIG. 5.7 – Evolution du LQI dans le temps.

et de la topologie du réseau. Rappelons-le, seules les lectures du LQI entre les nœuds et la Station de Base sont étudiées. En fait, cela montre l'instabilité du réseau et sa vulnérabilité vis à vis du support physique, même dans le *Scénario "1"*, pour lequel, compte tenu de la portée, les nœuds émettent très fort et sont plutôt très proches.

5.5.2 Impact de la position de la Station de Base

Dans la plupart des réseaux de capteurs, le rôle d'une Station de Base est de recueillir des données et de les envoyer à un serveur distant ou à l'utilisateur final. Habituellement, le LQI sert à déterminer la connectivité entre les différents nœuds. Dans cette section, nous discutons le *Scénario 24*. Dans ce scénario, nous disposons de 12 nœuds y compris la Station de Base.

Les nœuds sont espacés de 3 mètres les uns des autres et sont tous en ligne droite (avec une visibilité directe). La Figure 5.8 montre les valeurs du LQI entre les différents capteurs et la Station de Base. Nous avons remarqué que les chutes concernent la discontinuité dans le réseau et que la fluctuation des lectures du LQI est due à des perturbations dans le canal de communication. En outre, la position de la Station de Base peut avoir un effet subtil sur les performances. Par ailleurs, tous les nœuds sont placés sur le sol le long du mur. Nous avons testé ce scénario pendant plus de 1200 secondes. Malgré le nombre de nœuds déployés dans le réseau, pour des raisons de clarté, nous ne présentons les résultats

que pour certains nœuds.

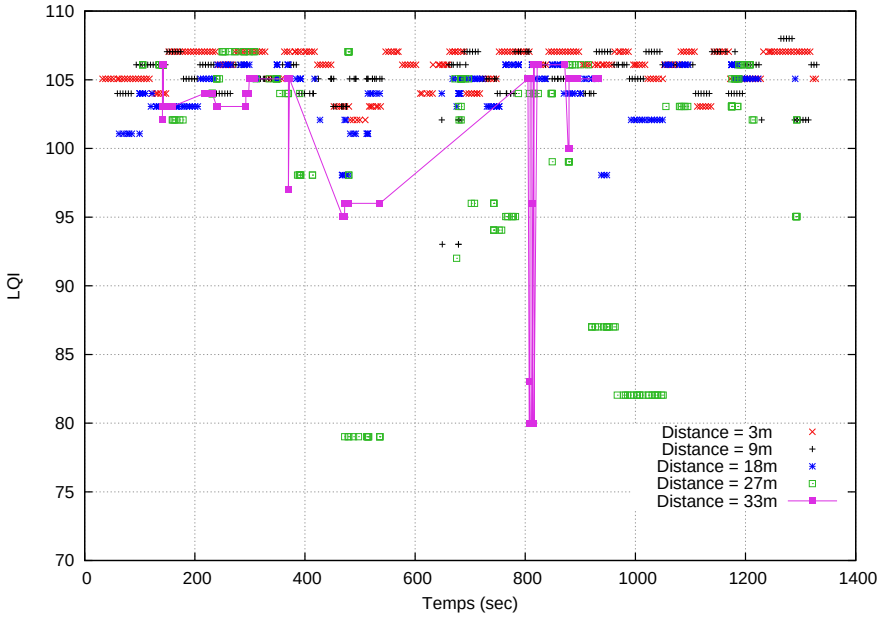


FIG. 5.8 – Impact de la position de la Station de Base.

Au départ, nous avons pu observer que le nœud qui est à 33 mètres de la Station de Base n'est pas lié directement à celle-ci. Par la suite, (dans l'intervalle de temps $50 - 500$ secondes), nous avons levé la position de la Station de Base d'environ 0.5 mètre du sol. Comme nous pouvons le constater sur la figure 5.8, en rehaussant simplement la position de la BS par rapport à celles des autres capteurs, on observe des changements majeurs dans les valeurs du *LQI*.

Plus tard, de façon discontinue, on joue avec la position de la BS en l'élevant puis en l'abaissant, finalement, à environ 800 secondes nous mettons fin à cette procédure. Entre ces périodes, on peut facilement distinguer les différentes chutes du *LQI* observées à maintes reprises. Une fois, que nous arrêtons ce processus, le nœud le plus éloigné se connecte via de multiples sauts à la Station de Base, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de connectivité directe avec elle. La fluctuation des valeurs *LQI* en raison de ces mouvements aléatoires apparaît clairement sur la figure 5.7.

5.5.3 Impact d'une puissance d'émission forte de la Station de Base

La puissance d'émission des nœuds constitue un autre aspect important des réseaux de capteurs. Cette puissance limite la portée de chaque capteur. Un réseau de capteurs repose sur des mécanismes de découverte de voisinage qui permettent la découverte de chemins vers la Station de Base. Par

conséquent, il est intéressant de voir comment les différents niveaux de puissance de la BS peuvent affecter le réseau. Les scénarios *26* et *27* sont différents en termes de niveau TPL de la BS. Dans les deux scénarios, nous avons 7 nœuds-capteurs en tout, espacés de 6 mètres et disposés en ligne droite.

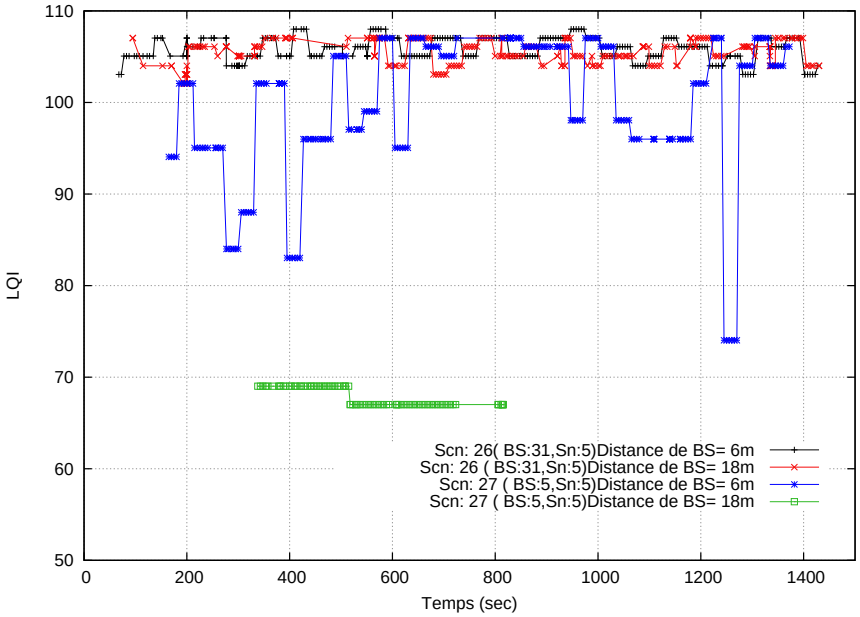


FIG. 5.9 – Impact d'une puissance d'émission forte de la Station de Base

La Figure 5.9 présente les valeurs du LQI entre chaque capteur et la Station de Base, deux réseaux différents (pour souci de clarté, seuls quelques nœuds sont représentés). Comme, nous comparons des valeurs du LQI, nous pouvons observer, que, tout en augmentant TPL de la BS, le LQI entre les nœuds et la BS s'améliore considérablement. Aussi, plus faible est le TPL de la BS, plus faible sera le LQI (à l'exception du capteur, qui est le plus proche de la BS). En outre, on peut observer la différence des valeurs du LQI du capteur le plus éloigné (il est placé à $18m$ de la Station de Base). Il se connecte directement à la Station de Base dans le *Scénario 26* (où celle-ci émet avec la puissance maximale) et se connecte via ses voisins dans le *Scénario 27* où la Station de Base émet avec une puissance faible.

Un niveau de puissance d'émission élevé pour un nœud donné conduit naturellement à la formation d'un cluster à un seul saut, les nœuds voyant directement la BS (même s'ils sont éloignés), et consomment beaucoup d'énergie en raison de leur fort niveau de puissance d'émission. De plus, chaque nœud tente de communiquer directement avec la BS au lieu de communiquer via plusieurs sauts. Cela peut poser plus de soucis par exemple en termes de trafic, comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre. En fait, dans le prochain paragraphe, nous allons amplifier cet effet de la topologie du réseau et la ramification de ce phénomène.

5.5.4 Impact des différents niveaux de puissance dans le cas d'un réseau hétérogène

La Table 5.2 présente une autre série de tests (*Scénarios "30" à "40"*). Ces sénarios sont déployés dans une salle de classe sans présence humaine. Nous avons déployé deux grilles de taille 4x4 et 3x6 nœuds. Dans les deux cas, les capteurs sont distants de 3 mètres les uns des autres. Dans ces scénarios, deux ensembles de *TPL* sont définis : SetMax{31} et SetLow{10,5,3}.

TAB. 5.2 – Description des scénarios en grille.

Scénario	Nombre de Nœuds	TPL_{BS}	TPL_{Nud}	Distance *(m)*
30	4x4	31	10	3
31	4x4	10	10	3
32	4x4	3	10	3
33	4x4	31	5	3
34	4x4	5	5	3
35	3x6	31	10	3
36	3x6	10	10	3
37	3x6	3	10	3
38	3x6	31	5	3
39	3x6	5	5	3
40	3x6	3	5	3

5.5.4.1 Qualité du lien en fonction de la distance

Ici, les variations de la qualité du lien ne sont pas totalement dues au changement des propriétés physiques du canal en raison de l'environnement fermé et restreint (une classe sans présence humaine).

Globalement, toute les valeurs collectées pour chaque combinaison (distance, puissance d'émission) varient entre 103 et 108 (figure 5.10). En outre, si nous nous référons à nos tests préliminaires (section 5.3.2) ainsi qu'à d'autres études [WLFH07], [LMH+03], [HAH06], les valeurs restent intéressantes dans la mesure où le taux de paquets reçus pour de telles valeurs est très élevé.

Pour un niveau de puissance d'émission donné, les valeurs du LQI sont légèrement différentes (c'est à dire qu'elles diminuent lorsque la distance à la Station de Base augmente). Pour une distance donnée, ces valeurs décroissent légèrement lorsque nous réduisons la puissance d'émission.

Lorsque la distance à la Station de Base est supérieure à 3 voire 6 mètres, nous observons des chutes

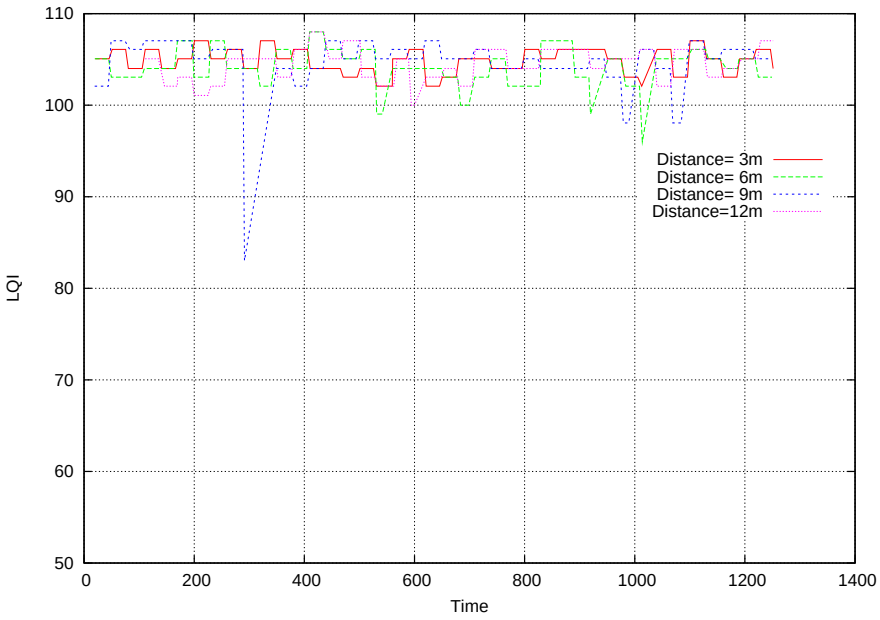


FIG. 5.10 – Variation du *LQI* dans le temps, *(scénario 33)*.

importantes du *LQI*.

Nous avons également remarqué que les variations des valeurs du *LQI* sont plus fréquentes pour les nœuds placés le long des murs que pour ceux placés en diagonale par rapport à la BS. Nous pensons que cela pourait être lié aux phénomènes de réflexion du signal.

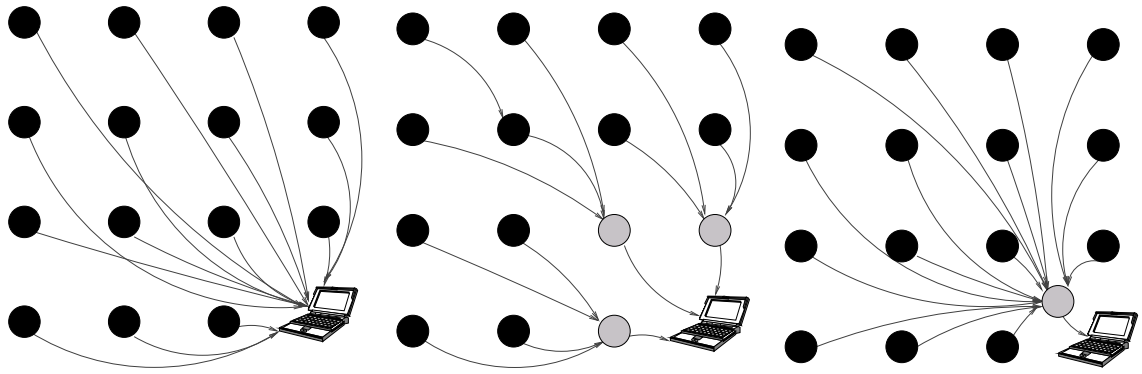
5.5.4.2 Influence de la puissance d'émission de la Station de Base sur la topologie

Comme nous l'avons déjà souligné, pour conduire cette étude, nous avons utilisé dans les expérimentations un algorithme de routage multi-sauts fondé sur la qualité du lien [TML04] implanté dans TinyOS. En effet, son code source est disponible pour la plate-forme *"Tmote Sky"*.

Selon cet algorithme, nous avons noté que la puissance d'émission de la Station de Base est un paramètre crucial. En outre, la Station de Base joue un rôle important dans la topologie du réseau et les changements de chemins. En effet, afin de permettre aux nœuds de choisir leur itinéraire pour rejoindre la Station de Base, cette dernière doit envoyer régulièrement des trames balise.

Comme indiqué sur la figure 5.11, nous analysons les résultats de ces tests dans trois cas distincts. Dans le premier cas, la station de base transmet avec une puissance supérieure à celles des autres nœuds. Dans ce cas, tous les nœuds notent que le lien vers la Station de Base est d'une qualité suffisamment élevée pour choisir ce lien direct (figure 5.11(a)).

Dans le second cas, la station de base transmet avec la même puissance que les nœuds. Nous avons



(a) (b) (c)

FIG. 5.11 – Effets de la puissance d'émission de la Station de Base.

alors observé certaines routes multi-sauts en particulier pour les nœuds les plus éloignés.

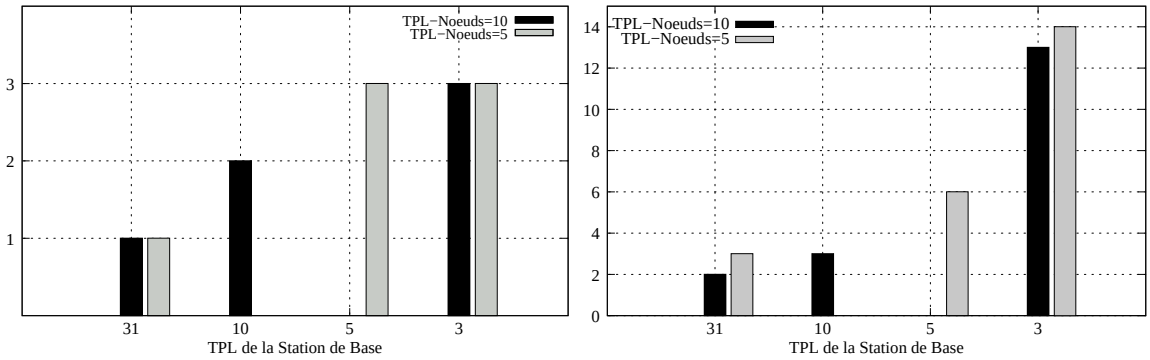
Dans le troisième cas, la station de base transmet avec une puissance inférieure à celles des autres nœuds, plusieurs chemins multi-sauts apparaissent ainsi qu'une importante charge de trafic sur les nœuds les plus proches de la BS (Fig. 5.11(b)). En effet, l'algorithme de routage propose alors des chemins optimaux (en terme de nombre de sauts) et plus efficaces (qualité du lien) via ces nœuds intermédiaires.

Par ailleurs, nous avons démontré que si l'on ajoute un autre nœud avec une grande puissance d'émission à côté de la Station de Base, tous les trafics transitent par l'intermédiaire de ce nœud (Fig. 5.11(c)).

5.5.4.3 Influence de la puissance d'émission des nœuds sur le *LQI* et le routage multi-sauts

À partir du moment où l'algorithme de routage est fondé principalement sur la qualité du lien, faire varier les niveaux de puissance des nœuds (les TPLs) implique certainement des changements dans la topologie du réseau. Ici, nous considérons les scénarios 30 à 40 pour analyser ces changements, en fonction du TPL des nœuds et de celui de la BS.

La figure 5.12(a) retrace le nombre moyen de sauts en fonction du TPL de la BS et celui des nœuds dans une grille de 3x6 nœuds. On peut noter que le nombre de sauts augmente avec la diminution du TPL de la Station de Base. Ce résultat appuie les observations du paragraphe précédent sur l'impact de la puissance d'émission de la Station de Base. Le nombre de sauts reste raisonnable (3 dans ces expérimentations), même avec la plus faible puissance de la BS en raison de la surface de déploiement relativement faible (6x15m).



(a) Nombre moyens de sauts

(b) Nombre de chemins multi-sauts

FIG. 5.12 – Nombre moyens de sauts et nombre de chemins multi-sauts en fonction de la puissance d'émission des nœuds et de celle la BS.

D'autre part, la figure 5.12(b) illustre la différence entre deux ensembles de scénarios {35,36,37} et {38,39,40}. Dans ces deux séries de tests, nous avons utilisé deux TPLs pour les nœuds (respectivement 10 et 5). Dans cette figure, on peut clairement constater que le nombre de chemins multi-sauts est toujours plus élevé lorsque le TPL d'un nœud est faible.

5.6 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude et l'analyse de la qualité du lien (indiquée par le paramètre LQI) dans les réseaux de capteurs sans fil. En s'appuyant sur une plate-forme matérielle couramment utilisée dans les réseaux de capteurs, nous avons effectué une étude expérimentale sur la variation de la qualité du lien et ses effets sur le réseau.

Dans la première série d'expériences, nous avons étudié l'évolution dans le temps du LQI et observé la dynamique du canal de transmission. Très brièvement, nous avons discuté l'importance du positionnement de la Station de Base. Nous avons vu comment le réseau est sensible à de petits déplacements de nœuds. Grâce à ces expérimentations, nous avons présenté les variations du LQI dans le temps et certaines perturbations aléatoires dues à des phénomènes externes et à des changements physiques. Il est très important d'étudier ces questions, dans la mesure où les capteurs peuvent ne pas être sujet à un déploiement régulier. Enfin, nous avons étudié l'impact de la puissance d'émission de la BS et observé comment des capteurs avec un TPL élevé peuvent influer sur la topologie du réseau et avoir des effets sur la connectivité entre les nœuds et la BS. Nous avons vu, qu'une puissance d'émission forte d'un nœud crée un cluster à saut unique.

Dans la deuxième série d'expérimentations, nous avons également étudié l'impact de la puissance d'émission des nœuds sur la qualité du lien qui affecte par conséquent la topologie du réseau. En effet, avec une puissance forte des nœuds et de la BS, nous avons souvent observé un seul cluster (avec la BS comme *clusterhead*). Lorsque nous avons considéré des puissances d'émission hétérogènes pour les différents nœuds, plusieurs clusters sont apparus (avec les nœuds à forte puissance comme *clusterheads*). Cela peut constituer une solution pour organiser le réseau en clusters. Toutefois, cette hétérogénéité peut affecter la durée de vie de ces nœuds et la connectivité du réseau (les nœuds relais meurent les premiers).

Nous avons également prouvé dans cette étude que la puissance de la Station de Base peut avoir un effet trompeur pour les nœuds les plus éloignés. En effet, ces nœuds peuvent juger qu'une communication directe avec la BS est préférable en raison de la qualité élevée du lien (BS− >Nœud) car la puissance de la BS est suffisamment élevée. Ils optent ainsi pour des communications directes. En revanche, avec une distance plus grande, le risque de perte de paquets peut augmenter. En effet, la qualité du lien dans l'autre sens (nœud à BS) n'est pas nécessairement la même en raison de la distance ou de la puissance faible du Nœud.

Finalement, un protocole de routage ne doit pas être uniquement fondé sur le *LQI*. La prochaine phase de notre travail consiste justement à exploiter les observations de cette étude expérimentale afin de mener une réflexion sur des mécanismes de routage à l'économie. En effet, compte tenu de nos résultats de mesures, il semblerait intéressant de réduire la puissance d'émission dans certaines conditions afin d'économiser l'énergie, ou de déployer des nœuds hétérogènes pour des considérations topologiques. Nous combinerons cette possibilité avec des techniques de partage de charge fondées sur les coûts énergétiques.

Chapitre 6

Maximisation de la durée de vie par équilibrage de charge

Sommaire

6.1 Introduction 85
6.2 Etat de l'art 87
6.3 Problématique 88
6.4 Formulation du problème 90
6.4.1 Les hypothèses de notre modèle 90
6.4.2 Choix d'une définition pour la durée de vie du réseau 91
6.4.3 Formulation 92
6.5 Stratégies de résolution 93
6.5.1 Routage de type plus court chemin 93
6.5.2 Solution optimale 94
6.5.3 Proposition d'une heuristique d'équilibrage de charge 98
6.6 Résultats 100
6.7 Discussion et directions futures 103
6.7.1 Cas d'une topologie en grille avec une Station de Base au centre 104
6.7.2 Cas de topologies irrégulières 106
6.8 Conclusion 106

6.1 Introduction

Telle que nous l'avons présentée dans le chapitre 3, la durée de vie est devenue la caractéristique clé pour l'évaluation des réseaux de capteurs. En effet, l'objectif de tout scénario d'application

est d'avoir des nœuds déployés, sans surveillance, pour des mois ou des années. Dans ce chapitre, nous abordons le problème de la consommation d'énergie et l'extention de la durée de vie d'un réseau de capteurs « tous-vers-un[1] ». Dans ce type de réseau, tous les nœuds génèrent des paquets et les envoient à une Station de Base ou un puits (*"Sink"*) à travers des chemins multi-sauts. Ce genre de configuration constitue le cas le plus classique de déploiement de réseaux de capteurs, cela s'éloigne du cas un peu particulier du chapitre 4 et pourrait correspondre dans ce contexte au cas d'un entrepôt par exemple. Le réseau est supposé d'assez grande taille, l'hypothèse de capteurs tous à portée les uns des autres n'est donc pas envisageable.

Au chapitre précédent, l'étude expérimentale a montré que lorsque les nœuds transfèrent leurs données à la Station de Base avec un routage multi-sauts, le modèle de trafic résultant est non-uniforme et surcharge les nœuds proches de la Station de Base. Le premier défi est d'assurer une longévité importante pour le réseau. À travers les différentes définitions que nous avons citées dans le chapitre 3, un réseau est certainement considéré comme étant « mort » lorsqu'il n'est plus capable d'acheminer les données vers la Station de Base. Nous nous arrêtons sur la définition qui désigne la durée de vie d'un réseau comme étant le temps passé depuis son déploiement jusqu'à l'instant où il sera considéré comme non opérationnel. En revanche, cet instant est spécifique de l'application. Dans cette étude, nous choisissons l'instant où le premier nœud meurt.

Dans ce chapitre, nous nous consacrons à une analyse détaillée de la durée de vie d'un réseau de capteurs. Nous nous focalisons sur des topologies régulières avec des nœuds immobilisés, nous proposons quelques stratégies destinées à équilibrer les consommations d'énergie des nœuds afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'équilibrage des consommations d'énergie passe par un partage de la charge du trafic surtout au niveau des nœuds critiques. Le partage de charge est une problématique qui a retrouvé un grand regain d'intérêt ces dernières années prenant par des formes très hétérogènes : multi-homing, network coding, réseaux coopératifs, etc. Elle n'est pas extrêmement nouvelle puisqu'elle existait par exemple déjà dans les réseaux téléphoniques des années 80.

Nous nous concentrons donc sur des mécanismes simples de routage par partage de charge et nous comparons les performances de ces stratégies avec d'autres méthodes, notamment l'algorithme de « routage équiproportionnel » et l'algorithme du « plus court chemin ». En outre, nous étudions une solution optimale qui calcule les proportions de trafic "saut par saut" et comparons les résultats des différentes stratégies à cette solution optimale.

[1] tous-vers-un ou *"many-to-one"* est un modèle de trafic très courant dans les réseau de capteurs.

6.2 Etat de l'art

Minimiser la consommation d'énergie est un objectif majeur dans plusieurs réseaux sans fil multi-sauts, spécialement lorsque les nœuds du réseau sont alimentés par des batteries. Ce besoin est devenu énormément important pour les réseaux de capteurs sans fil qui diffèrent des autres types de réseaux multi-sauts par le fait que dans la plupart des cas, les données des nœuds-capteurs doivent être transmises vers un seul puits ou Station de Base.

De nombreuses études de recherche ont été menées afin de diminuer la consommation d'énergie liée aux communications et prolonger la durée de vie du réseau. Beaucoup de ces techniques sont résumées dans [ACFP09]. Certains efforts ont été fournis récemment pour analyser la « borne supérieure » de la durée de vie des réseaux de capteurs ad hoc. Un modèle analytique a été proposé dans [JP07] où, Jian et Prasant ont étudié quelques approches en vue d'atténuer ce qu'ils appellent le "energy hole problem". Dans [BS02], les auteurs ont cherché les bornes supérieures de l'extention de la durée de vie d'un réseau. Ils ont illustré le compromis entre la densité des nœuds et la durée de vie du réseau pour une technique de conservation d'énergie dans les réseaux ad hoc sans fil. Bhardwaj *et al.* [BC02, BC01] ont étudié également la borne supérieure de la durée de vie des réseaux de capteurs de type collecte de données (data-gathering sensor networks). Ils supposent une source de données distribuée de façon aléatoire dans une région avec une certaine densité de probabilité, et le puits (Station de Base) est situé en un point fixe. Ils calculent la puissance minimale requise pour transmettre un bit de la source au puits, puis ils calculent la borne supérieure de la durée de vie du réseau sur la base de cette consommation minimale d'énergie.

Duarte-Melo *et al.* [DML02] ont proposé une technique de *"clustering"* hiérarchique afin de prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs. Ils ont calculé l'espérance mathématique d'une distance émetteur-vers-récepteur, les auteurs ont donné des résultats numériques sur des estimations de la durée de vie du réseau et le nombre optimal de *"clusters"*. Haenggi a analysé dans [Hae03] quatre stratégies fondées sur le modèle de lien *"Rayleigh fading"* pour équilibrer la consommation d'énergie des nœuds. Ses analyses ont été restreintes à une chaîne unidimentionnelle de N nœuds.

Coleri *et al.* [SMJ02] ont étudié la durée de vie des réseaux de capteurs. Les réseaux qu'ils considérent dans leur étude sont organisés en arbres multi-sauts. Ils ont utilisé les automates à états finis pour analyser la durée de vie des nœuds. Ils ont séparé les nœuds en quatre groupes en fonction de leur distance au puits de données. Toutefois, leur analyse est principalement axée sur la durée de vie des différents nœuds au lieu de celle du réseau.

Bien que toutes les études ci-dessus aient pour objectif l'extension de la durée de vie du réseau, les auteurs ont étudié différentes topologies de réseau et posé à chaque fois des hypothèses différentes pour

distinguer leurs travaux des autres.

Nous considérons dans ce travail des nœuds stationnaires déployés de façon uniforme et régulière selon une topologie en grille. Nous prenons en compte différentes puissances d'émission pour le calcul des proportions de trafic de chaque nœud dans le but d'étendre la durée de vie du réseau. Après fomulation du problème, nous déduisons une solution optimale, puis nous proposons quelques stratégies afin d'équilibrer les consommations d'énergie des nœuds et nous comparons leurs résultats à la solution optimale.

6.3 Problématique

L'origine de ce travail provient de l'étude expérimentale [BBD+09] sur la qualité du lien que nous avons présentée dans le chapitre précédent. Nous avons étudié l'impact de la puissance de transmission sur la topologie du réseau et la qualité du lien (LQI) entre les nœuds. En raison de l'algorithme de routage qui est fondé sur la qualité du lien, la première observation qui ressortait est que tous les nœuds tentent de joindre la Station de Base en se connectant et en envoyant leurs données aux nœuds les plus proches d'elle. En effet, si l'on considère la figure 6.1(a) qui propose un arrangement possible des nœuds-capteurs. *A priori* et sans mesures appropriées, nous identifions les nœuds les plus critiques du réseau.

Visiblement, la charge de trafic sur les nœuds les plus proches de la Station de Base est considérablement plus importante que celle au niveau des nœuds les plus éloignés. Par conséquent, ces nœuds les plus proches vont épuiser leurs batteries rapidement et meurent les premiers rendant rapidement le réseau inutilisable.

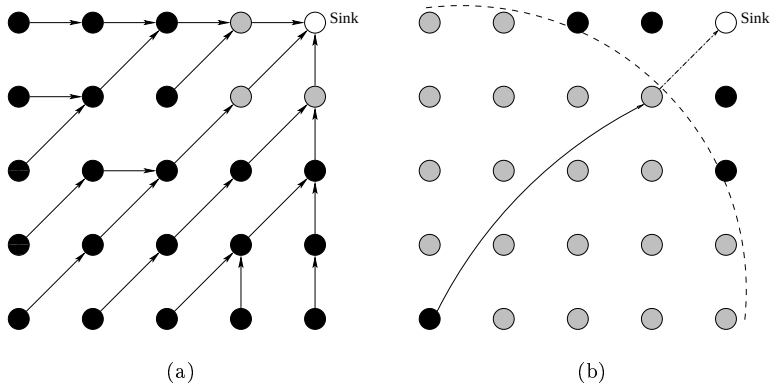


FIG. 6.1 – À droite - Nœuds critiques dans une topologie sous forme de grille et avec une Station de Base dans le coin. À gauche - Impact de la puissance d'émission.

Notre idée est que des protocoles très réduits et des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour le routage. Dans ce chapitre nous nous proposons de discuter quelques stratégies afin d'assurer une durée de vie maximale du réseau en équilibrant l'énergie de la manière la plus équitable possible. Puisque toutes les données sont à faire suivre vers la Station de Base *(Sink)* à travers un routage multi-sauts, le modèle de trafic n'est pas uniforme, l'essentiel de la charge se concentrant sur les nœuds proches de la Station de Base.

Les protocoles et les algorithmes qui sont généralement retenus dans les réseaux de capteurs sans fil sont globalement issus de la réflexion menée dans le contexte des réseaux ad hoc un peu adaptés, le cas échéant, dans un contexte de type économie d'énergie. Ils se veulent donc généralistes vis à vis des réseaux de capteurs sans tenir complètement compte de bonnes propriétés (topologiques, absence de mobilité) que l'on peut trouver dans les réseaux de capteurs. Notre point de vue est diamétralement opposé, on suppose que l'on a une topologie régulière, des nœuds immobiles et à des localisation connues, un trafic régulier à émettre (pas d'information temps réel à remonter de type alerte). Dans ce genre de configuration, il semble qu'il est préférable de considérer des protocoles de routage aussi légers que possible voire une algorithmique simple. Il nous semble en particulier très raisonnable de considérer des routages statiques.

Ce point de vue n'est pas nouveau car nous allons retrouver des caractéristiques proches de celles des réseaux informatiques des années 70. Certaines propositions ont déjà été effectuées en ce sens, reposant par exemple sur du routage aléatoire [FML09] sur une topologie de grille, on enverrait vers chacun des voisins, avec un routage aveugle et une probabilité de $\frac{1}{4}$, sans se soucier de la destination. Une autre solution est proposée dans [SJZ06] consiste en une découverte de voisinage, un routage aléatoire et une minimisation de la consommation globale d'énergie. Le problème est NP-complet dans un cas général et les auteurs proposent des heuristiques mais qui restent dans un cadre un peu général. Qui plus est dans ces travaux, le routage aléatoire s'assortit d'une obligation pour les nœuds de rester allumés dans la perspective de réception d'un paquet *(idle listening)* et bien évidemment cela implique le phénomène d'*overhearing* (on reçoit aussi des paquets qui ne nous sont pas destinés). L'étude que nous avons menée dans le chapitre 4 et les travaux nombreux que l'on retrouve dans la littérature incitent au contraire à des réveils juste au bon moment et à des endormissement dès que l'on n'a plus rien à émettre ou à recevoir. Nous supposerons par la suite que nous sommes capables de trouver des planifications de ces périodes de communication (remarquons que se sont des hypothèses qui sont généralement faites dans les études de capacité au niveau de la couche physique). Cette hypothèse peut être vérifiée par expérimentation.

6.4 Formulation du problème

Après l'identification des nœuds critiques, plusieurs stratégies pour partager la charge de ces nœuds peuvent être adoptées afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'idée est que des protocoles très réduits ou des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour le routage.

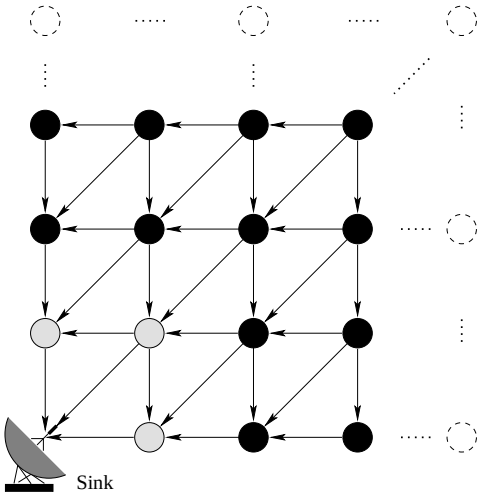


FIG. 6.2 – Réseau de capteurs avec une topologie régulière *(Station de Base dans le coin)*.

En tenant compte de la consommation de chaque nœud, nous nous intéressons à la maximisation de la durée de vie d'un réseau. Fondées sur un modèle d'hypothèse bien précis, les stratégies décrites dans cette section ont pour but de partager le trafic et déquilibrer la consommation d'énergie des différents nœuds.

6.4.1 Les hypothèses de notre modèle

Afin d'améliorer la compréhension de notre proposition dans la suite de ce chapitre, nous mettons quelques hypothèses raisonnables dans le cas d'un réseau avec une topologie sous forme de grille et avec un modèle de trafic *tous-vers-un*. Les hypothèses sont comme suit :

- Les nœuds sont distribués dans une topologie sous forme de grille régulière de taille $N = M^2$ (Fig. 6.4).
- Chaque nœud génère de manière continue des données avec un débit constant (CBR) puis les envoie à la Station de Base *(Sink)* à travers des chemins multi-sauts.
- Nous envisageons de faire un routage saut par saut entre les nœuds accessibles. En effet, le partage de charge est possible sans signalisation. Nous pouvons faire initialement quelques calculs

(par exemple au niveau de la Station de Base) et transmettre les proportions de trafic aux différents nœuds-capteurs.

- Un modèle de réseau *"mostly-off"* est meilleur que le modèle *"mostly-on"*. C'est pour cette raison que nous préférons parler de proportions de trafic à la place de routage probabiliste qui requiert lui des nœuds *"mostly-on"*. Par conséquent, comme le montre la figure 6.1(b), dans des réseaux *"mostly-on"*, la puissance de transmission a un impact majeur sur la surconsommation d'énergie dûe à l'écoute abusive (overhearing).
- La couche MAC est fondée sur un ordonnancement parfait entre les nœuds de telle sorte qu'il n'y ait pas de collision ni de retransmission. On peut aussi s'inspirer par exemple de la méthode du chapitre 4 en prévoyant des marges pour retransmissions.
- Les nœuds ont deux portées différentes de transmission d et $\sqrt{2}d$ mètres.
- Selon cette formule bien connue donnée dans [Rap06] : $P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 L d^n}$ nous supposons que chaque nœud utilise deux niveaux de puissance d'émission TPL_1 pour une portée de d mètres et TPL_2 pour la portée $\sqrt{2}d$ mètres.
- Puisque la consommation d'énergie (E) lors de l'émission est proportionelle la puissance d'émission P_{tx} (équation (1) de [MC02]) nous posons : $E(\text{TPL}_2) \simeq 2.E(\text{TPL}_1)$

6.4.2 Choix d'une définition pour la durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau est la période qui commence au déploiement initial du réseau et finit lorsque l'on considère le réseau comme non-fonctionnel. En revanche, considérer un réseau non-fonctionnel est spécifique à l'application et c'est en raison de cette spécificité qu'une multitude de définitions existent. Parmi toutes les définitions de la section 3.2, nous avons choisi d'adopter la première i.e., la durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie. Par conséquent, si nons considérons que T_i est la durée de vie du nœud $i \in \Omega$ (Ω est l'ensemble des nœuds), alors la durée de vie du réseau s'écrit de la façon suivante :

$$T_{Reseau} = \min_{i \in \Omega} T_i,$$

Cette définition assouplit l'analyse du scénario que nous avons retenu. Maximiser la durée de vie du réseau est équivalent finalement à maximiser la durée de vie minimale d'un nœud. Étendre le moment où le premier nœud meurt garantit que le maximum des consommations d'énergie de chaque nœud soit réduit au minimum. Cela revient à équilibrer la charge du trafic sur le réseau de telle sorte qu'aucun nœud ne s'expose à une forte consommation d'énergie. Notre idée consiste alors à mettre en œuvre

des mécanismes simples pour le routage. Nous illustrons celà sous forme de stratégies dans la partie suivante.

Remarque 1 :

Déterminer la durée de vie maximale du premier nœud qui tombe en panne revient à minimiser l'énergie maximale consommée E par les nœuds-capteurs du réseau.

6.4.3 Formulation

Le problème peut être formulé de la manière suivante : Soit $N = M\text{x}M$ le nombre total de nœuds et $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, .., \Lambda_N)$ le vecteur des débits de tous les nœuds du réseau. La charge $Lambda_i$ du nœud i peut s'écrire de la façon suivante :

$\Lambda_i = \lambda + \sum_j \Lambda_j p_{ji}$, avec λ trafic généré par i lui-même (on suppose que chaque nœud engendre le même volume de trafic issu de ses mesures) et p_{ij} proportion de trafic qu'envoie le nœud j vers i. donc nous pouvons écrire :

$L = \lambda \mathbb{1} + L.\mathbb{P}$

$\mathbb{1}$ est le vecteur identité et $\mathbb{P}$ est la matrice stochastique des proportions de trafic entre les nœuds.

$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & .. & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & .. & p_{2N} \\ .. & .. & .. & .. \\ p_{N1} & p_{N2} & .. & p_{NN} \end{pmatrix}$$

La matrice est obtenue sous la contrainte suivante : $\sum_{j=1}^{N} p_{ij} = 1, \forall i, j \in \{1..N\}^2$

Soit $\mathbb{Q}$ la matrice des coûts tenant compte de la puissance de d'émission entre chaque couple de nœuds :

$$\mathbb{Q} = \begin{pmatrix} q_{11}.p_{11} & q_{12}.p_{12} & .. & q_{1N}.p_{1N} \\ q_{21}.p_{21} & q_{22}.p_{22} & .. & q_{2N}p_{2N} \\ .. & .. & .. & .. \\ q_{N1}p_{N1} & q_{N2}p_{N2} & .. & q_{NN}p_{NN} \end{pmatrix},$$

q_{ij} est la puissance de transmission entre les nœuds i et j.

Pour maximiser la durée de vie du réseau nous devons minimiser la consommation d'énergie des nœuds critiques. Ces derniers sont ceux qui consomment le plus d'énergie dans le réseau.

Soit E l'énergie consommée par un nœud-capteur du réseau, l le traffic sortant, λ le trafic entrant et $\mathbb{1} = (1, \ldots, 1)$ le trafic normalisé engendré par chaque nœud. Nous comptons 1 unité d'énergie pour la réception d'un paquet.

$$E_{\mathbf{n}} = l_{\mathbf{n}} + \sum_{\mathbf{m}} \Lambda_{\mathbf{n}} p_{\mathbf{n},\mathbf{m}} q_{\mathbf{n},\mathbf{m}}$$

Le problème est alors défini comme suit :

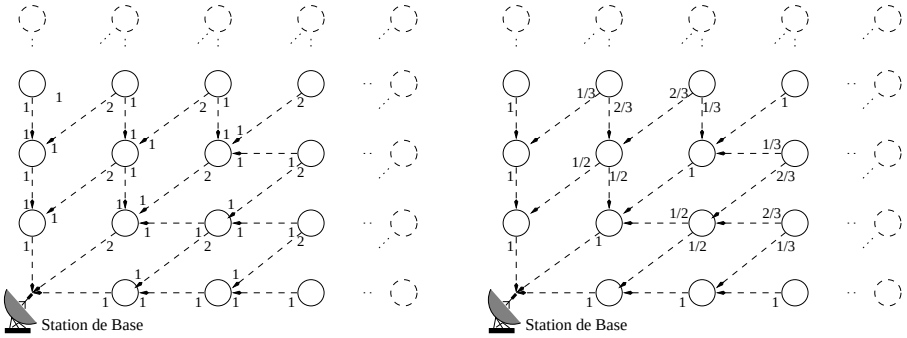
$$E^* = \min_{\mathbb{P}} E(\mathbb{P}) \tag{6.1}$$

C'est un problème non linéaire avec des contraintes linéaires. Ce problème est résolu lorsque les capteurs sont placés selon une topologie en grille et lorsque la puissance d'émission maximale q_{ij} utilisée est égale à 2. Le cas optimal peut être obtenu lorsque les trois nœuds voisins de la Station de Base (La Station de Base est placée dans le coin de la grille) consomment une énergie identique comme nous allons le démontrer par la suite.

6.5 Stratégies de résolution

6.5.1 Routage de type plus court chemin

Une stratégie pour éviter à certains nœuds de consommer de l'énergie inutilement est de choisir le plus court chemin (au sens de la consommation d'énergie) ou bien de partager la charge du trafic sur plusieurs plus courts chemins lorsque le nœud en a plusieurs de longueur identique[2].



(a) Représentation des coûts d'émission et de réception

(b) Représentation des proportions de routage

FIG. 6.3 – Stratégie du plus court chemin.

Dans le cas d'une topologie en grille et dans notre contexte, il est évident que le plus court chemin correspond à celui qui engendre le plus faible coût en terme de consommation d'énergie. En revanche, trouver le chemin qui consomme le moins d'énergie ne sera pas celui qui garantira la plus grande longévité. On pourrait imaginer que les nœuds communiquent leur énergie résiduelle et que l'on cherche le chemin, qui maximise l'énergie résiduelle. Le surcoût de signalisation nous semble disproportionné par rapport au gain.

[2]Cela ressemble alors à un partage de charge comme le propose *OSPF (Open Shortest Path First)*.

La figure 6.3(a) montrant l'algorithme du plus court chemin, illustre également les coûts en émission (coût sortant) et en réception (coût entrant). Nous avons remarqué par un simple calcul que le trafic est orienté comme suit :

- les nœuds sur les deux bords convergeant vers la Station de Base et envoient toujours leur données dans le sens de la bordure à travers les nœuds frontaliers.
- les autres nœuds envoient leur données soit en diagonale (avec un coût de 2 unités en émission), soit il essayent de rejoindre la diagonale principale dans le sens de la BS.

Par ailleurs, on doit déterminer pour chaque nœud le nombre de plus courts chemins possibles passant par chacun de ses voisins afin déquilibrer la charge (cf. 6.3(b)). Nous analysons les résultats de cette stratégie dans la section 6.6.

Routage équiproportionnel

Par analogie avec le routage équiprobable, nous avons également considéré un routage équiproportionnel où les nœuds décident localement de distribuer les proportions de trafics de façon équitable entre leur voisin en amont. Nous rappelons que l'idée d'un routage probabiliste est écartée en raison du modèle *"mostly-off"* choisi.

6.5.2 Solution optimale

Nous présentons un cas optimal pour équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds critiques. En raison de leurs portées, les nœuds les plus demandés sont ceux qui sont proches de la Station de Base. En effet, ils ont la charge de délivrer tout le trafic émanant de tous les autres nœuds. Ils reçoivent donc $\lambda_r = (N-4)\lambda$; et ils émettent $\lambda_e = (N-1)\lambda$, où λ est le trafic généré par chaque nœud. On note $\phi_e = N-4$ les autres nœuds-capteurs dans le réseau.

À présent, associons des coordonnées à chaque nœud : (i, j) tel que dans la figure 6.5(a). Pour l'énergie consommée en réception, les voisins directs de la Station de Base vont consommer au moins :

$$E = E_{r,min} = (N-4)\lambda.P_1 \tag{6.2}$$

P_1 étant la puissance d'émission pour une distance d.

- Soit p, la proportion du trafic venant directement vers "$(2,2)$", et pour des raisons de symétrie, $\frac{1-p}{2}$ qui passe par "$(1,2)$" et "$(2,1)$".
- Soit q, la proportion du trafic envoyée par "$(2,2)$" directement à la Station de Base, et $\frac{1-q}{2}$ celui qui est envoyé respectivement à "$(1,2)$" et "$(2,1)$".

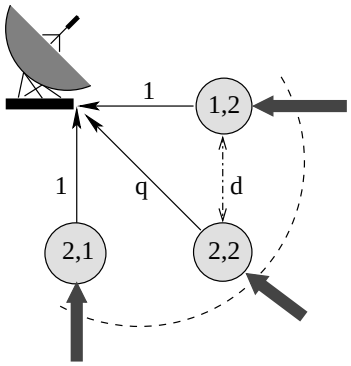


FIG. 6.4 – Analyse du cas optimal.

- L'envoi d'un message de "$(1,2)$" à "$(2,2)$" n'a pas d'intérêt parce qu'une émission de "$(1,2)$" à "$(2,2)$" est aussi coûteuse qu'une émission directe à la Station de Base. En plus elle va coûter certainement au nœud "$(2,2)$" lui-même.

Pour la suite de notre analyse, soit :

$E_{r,(i,j)}$ l'énergie consommée en réception par le nœud (i,j),

$E_{e,(i,j)}$ l'énergie consommée en émission par le nœud (i,j) et

$E_{(i,j)}$ l'énergie totale consommée par le nœud (i,j).

Nous obtenons :

$$\begin{aligned} E_{r,(1,2)} &= E_{r,(2,1)} = \frac{1-p}{2}\lambda P_1 \phi_e + \lambda P_1\{1+p\phi_e\}\frac{1-q}{2} \\ E_{e,(1,2)} &= E_{e,(2,1)} = E_{r,(1,2)} + \lambda P_1 \\ \frac{E_{(1,2)}}{\lambda P_1} &= 2 + \phi_e - q(1+p\phi_e) \\ \frac{E_{(2,2)}}{\lambda P_1} &= 1 + 2p\phi_e + q(1+p\phi_e) \end{aligned}$$

Nous cherchons alors à minimiser la consommation maximale de chacun des nœuds "$(1,2)$", "$(2,1)$" et "$(2,2)$". Puisque $E_{(1,2)} = E_{(2,1)}$, le problème s'écrit comme suit :

$$\min_{p,q\in(0,1)^2} \max(E_{(1,2)}, E_{(2,2)}) \tag{6.3}$$

Cela correspond à un problème linéaire en posant $x = q(1+p\phi_e)$. Nous trouvons alors :

$$p^* = \frac{\phi_e - 1}{4\phi_e};\ q* = 1 \tag{6.4}$$

Avec : $E^*_{(1,2)} = E^*_{(2,2)} = \lambda P_1\{2 + \frac{3(\phi_e-1)}{4}\}$

Par ailleurs, les questions qui se posent sont : *Ce minimum peut il être atteint ? Sommes nous sûrs qu'aucun autre nœud ne consommera plus ?*

La fonction objectif (6.3) devient alors :

$$E^* = \min_{\mathbb{P}}(E(\mathbb{P})) \tag{6.5}$$

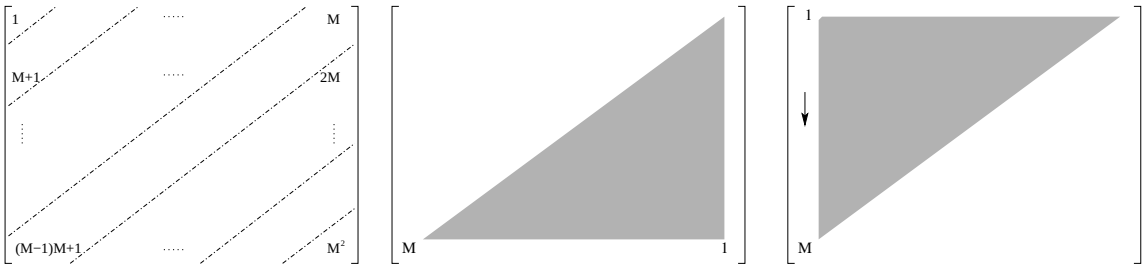
où :

$$E(\mathbb{P}) = \max_{i,j} E_{(i,j)}$$

et $\mathbb{P}$ une matrice stochastique contenant les proportions de trafic.

$$E^* \geq E^*_{(1,2)}$$

Construisons la solution : nous concevons une solution où la consommation d'énergie est la même pour tous les nœuds se trouvant sur la même diagonale (Fig. 6.5(a)). À présent, nous procédons, dans les tables ci-après, à l'analyse du trafic et à la consommation d'énergie dans chaque diagonale. À titre indicatif, les valeurs d'énergie dans les tables, sont divisées par λP_1.



(a) (b) (c)

FIG. 6.5 – Analyse du cas optimal.

Les diagonales "1" à "M" sont en dessous de la diagonale principale (Figure 6.5(b)) :

Diagonale	Nombre de nœuds	Total reçu	Réception/nœud	Émission/nœud	Energie
1	1	0	0	1	1
..	..	..	..	..	..
k	k	$\frac{k(k-1)}{2}$	$\frac{k-1}{2}$	$\frac{k-1}{2}+1$	k
..	..	..	..	..	..
M	M	$\frac{M(M-1)}{2}$	$\frac{M-1}{2}$	$\frac{M-1}{2}+1$	M

Les nœuds consomment au plus M.

$$\frac{E_{(1,2)}}{\lambda P_1} = \frac{5+3\phi_e}{4} = \frac{3M^2-7}{4} > M \quad si\ M > 2.$$

Les diagonales "4" à "$M-1$" au-dessus de la diagonale principale (Fig. 6.5(c)) :

Diagonale	Nombre de nœuds	Total reçu	Réception/nœud	Émission/nœud	Energie
4	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..
k	k	$M^2 - \frac{k(k+1)}{2}$	$\frac{M^2}{k} - \frac{k+1}{2}$	$\frac{M^2}{k} - \frac{k+1}{2} + 1$	$\frac{2M^2}{k} - k$
..	..	..	..	..	..
M-1	M-1	$M^2 - \frac{M(M-1)}{2}$	$\frac{M^2}{M-1} - \frac{M}{2}$	$\frac{M^2}{M-1} - \frac{M}{2} + 1$	$\frac{2M^2}{M-1} - (M-1)$

$\frac{2M^2}{k} - k$ est une fonction décroissante de k et l'énergie atteint le maximum pour $k = 4$,

$\frac{2M^2}{4} - 4 = \frac{2M^2-16}{4} < \frac{3M^2-7}{4}$

Par conséquent, en dehors de la zone à portée de la Station de Base, les nœuds qui consomment le plus sont ceux situés sur la 4-ème diagonale. Ils consomment moins que les nœuds à portée.

3-*ème diagonale :* Nous sommes en mesure de trouver des proportions satisfaisant l'équation (6.4) (se referer à la figure 6.6), le nœud $(3,1)$ respectivement $(1,3)$ envoie tout au nœud $(2,1)$ respectivement $(1,2)$.

On obtient finalement :

$E_{(3,1)} = E_{(1,3)} < E_{(2,1)} = E^*$

Le minimum pour $(1,2),(2,1),(2,2)$ est E^*

En appliquant les règles de calcul proposées dans les deux tables, on obtient les proportions de routage illustrées dans la figure 6.6, par la même occasion la matrice $\mathbb{P}$ pour laquelle : $E(\mathbb{P}) = E^*(1.2)$ et finalement :

$$E^* = \lambda P_1 \left(\frac{3M^2-7}{4}\right) \tag{6.6}$$

Remarque 2 :

Pour ce genre de problèmes, nous envisagons que tous les calculs soient effectués pas la Station de Base qui transmet les décisions de routage aux différents nœuds (par exemple avec de l'innondation) ; nous pouvons faire précéder celà par des techniques de découvertes topologiques. Nous pouvons même

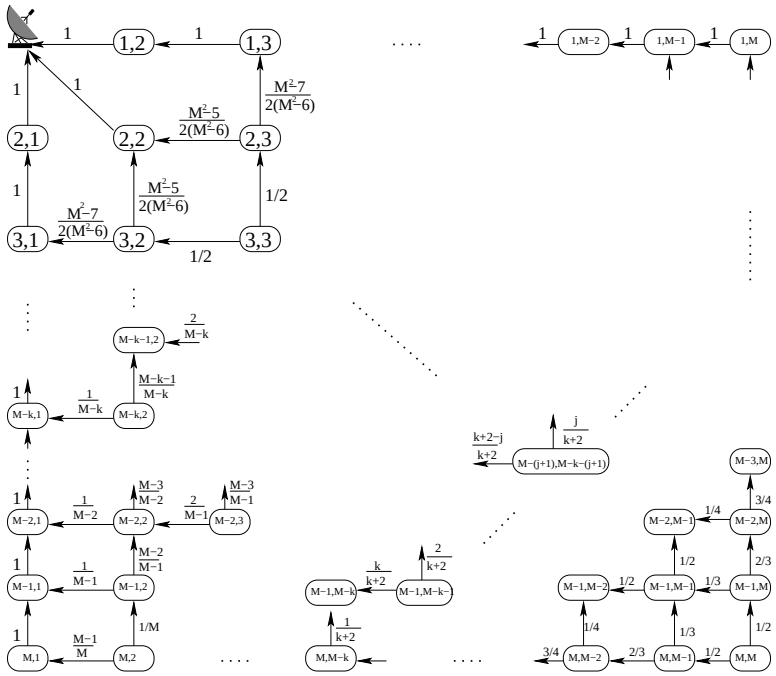


FIG. 6.6 – Matrice stochastique pour la solution optimale.

préprogrammer les capteurs avec les informations de routage.

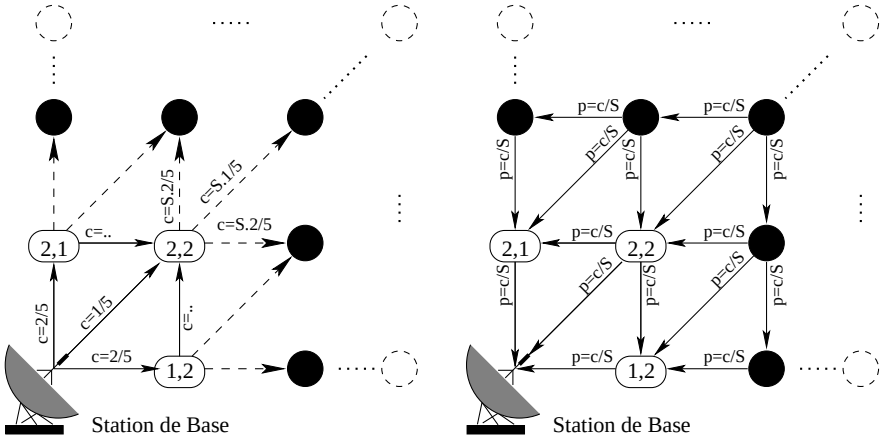
6.5.3 Proposition d'une heuristique d'équilibrage de charge

La solution optimale n'étant calculable que dans des cas particuliers, donc nous avons pensé à des heuristiques pouvant être mises en œuvre dans des contextes plus généraux. Avec les enseignements tirés jusqu'à présent nous avons proposé une heuristique qui tente d'améliorer l'équilibrage de la charge du trafic afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Le principe de cette heuristique est de distribuer les contributions de chaque nœud depuis la Station de Base en les considérant comme proportionnelles à la puissance de transmission de chaque nœud. On ne considère donc que les nœuds à portée les uns des autres. Un nœud sera dit en aval (resp. en amont) d'un autre nœud s'ils sont sont à portée et qu'il est plus proche (resp. plus loins) de la station de base. Elle est illustrée dans la figure 6.7(a) et procède selon les étapes suivantes :

1. En commençant par la Station de Base, on calcule pour chaque nœud les contributions de chacun

de ses voisins en amont en tenant compte de la puissance avec laquelle ils émettent pour l'atteindre. Par exemple, la Station de Base a trois voisins en amont : "$(1,2)$", "$(2,2)$", et "$(2,1)$" (avec un niveau de puissance d'émission 2) donc les contributions de chacun sont respectivement $\frac{2}{5}$, $\frac{2}{5}$ et $\frac{1}{5}$ (Fig. 6.7(a)).

2. Par la suite, on impute ces contributions à chacun des voisins en amont. Avant cela, on calcule la somme des contributions que les nœuds reçoivent de leurs voisins en amont. Par exemple dans la figure 6.7(a), le nœud "$(2,2)$" reçoit 3 contributions ; une de la Station de Base, une du nœud "$(1,2)$" et une autre du nœud "$(2,1)$". Soit S la somme de ses 3 contributions. Le nœud "$(2,2)$" distribue finalement les contributions à chacun de ses voisins en aval.



(a) Calcul des contributions.

(b) Calcul des proportions

FIG. 6.7 – L'heuristique d'équilibrage de charge. (c contribution sur un lien et S somme des contributions.)

L'heuristique est également décrite par l'algorithme suivant :

On note $V(j)$ le voisinage d'un nœud i et $d(i,j)$ la distance de i à j. Dans notre exemple, le poids $Poids(j,i) \propto d^2(j,i)$.

Algorithm 1 Heuristique des contributions

ENTRÉES: $G(N, A)$, $V = \{v_i\}$, $i \in \Omega$

SORTIES: Proportion(i,j)

{Calcul des contributions}

pour tout $i \in \Omega$ **faire**

pour tout $j \in \Omega$ **faire**

si $j \in V(i)$ et $d(i, SB) < d(j, SB)$ **alors**

$Contribution(j, i) \leftarrow SommeContributions(i) \times Poids(j, i)$

$SomeContributions(j) \leftarrow SomeContributions(j) + Contribution(j, i)$

finsi

fin pour

fin pour

{Calcul des proportions}

pour tout $j \in \Omega$ **faire**

$Proportion(i, j) \leftarrow Contribution(i, j)/SommeContributions(i)$

fin pour

Retourner Proportion(i,j)

6.6 Résultats

Pour calculer la consommation d'énergie des stratégies "plus court chemin", "équiproportionnel" et l'"heuristique", nous avons implanté en langage C, les algorithmes correspondants à chacune des stratégies. Cela peut se faire par la construction de systèmes linéaires et faisant le calcul rapidement, mais nous avons préféré automatiser et fusionner le calcul des proportions et le déroulement du trafic pour obtenir les consommations. Le calcul est simple, avec un trafic initial λ pour chaque nœud, on déroule le trafic depuis le nœud le plus éloigné (au fond de la grille) vers la station de base. En remontant diagonale par diagonale, le trafic est partagé en fonction des proportions calculées.

Répartition des consommations dans la grille

Dans un premier temps, nous avons calculé les consommations de chaque nœud selons les stratégies "plus court chemin", "routage équiproportionnel" et l'"heuristique". Cela a le but de confirmer la position des nœuds critiques d'une part et de comparer les trois stratégies d'autre part. La figure 6.8 montre les consommations d'énergie en fonction de la position du nœud dans la grille.

Nous observons que les nœuds qui consomment le plus sont ceux à côté de la Station de Base, puis ceux qui sont au début de chaque ligne matricielle ou sur la diagonale. Les résultats observés sur les

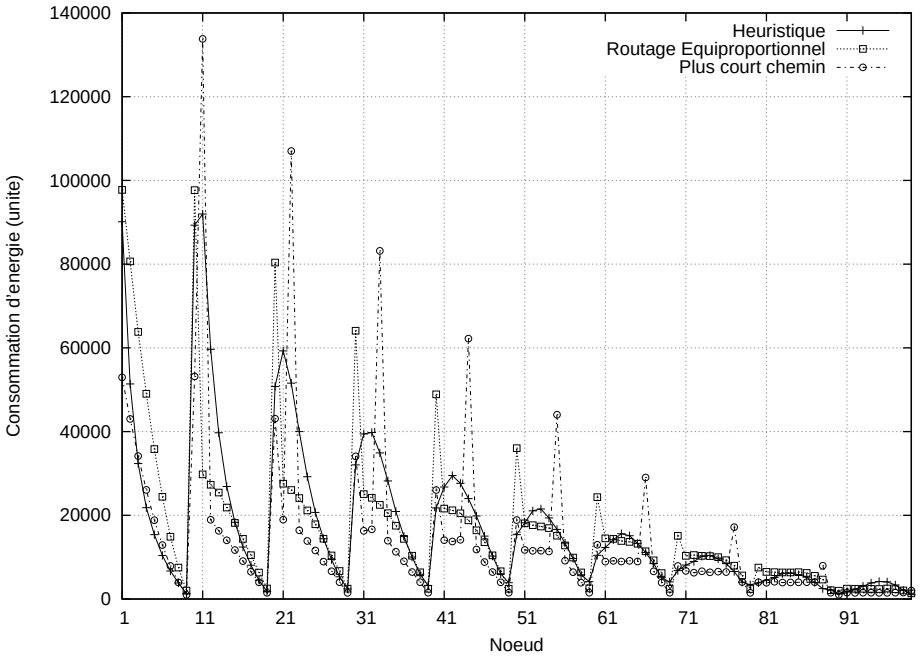


FIG. 6.8 – Énergie consommée (en unité) par chaque nœud dans une grille de 10x10 nœuds, chaque nœud génère 1000 paquets.

courbes de la figure 6.8 font ressortir un net avantage en faveur de l'heuristique d'équilibrage de charge. Les nœuds critiques dans les trois stratégies sont respectivement le nœud "1" (correspondant à "$(1,2)$") pour l'heuristique et pour le routage équiproportionnel et le nœud "11" (il correspondant à "$(2,2)$", sur la diagonale) pour le routage de type plus court chemin. Ils s'agit des nœuds qui ont consommé le maximum d'énergie correspondant respectivement à 90107, 98782 et 133817 unités d'énergie. Cela dénote un gain d'énergie en faveur de l'heuristique d'abord puis au routage équiproportionnel par rapport à l'algorithme du plus court chemin.

Consommations des nœuds critiques

Dans ce paragraphe nous allons comparer les résultats calculés pour les trois stratégies précédentes avec la solution optimale. Selon l'étude précédente, il est évident que le problème, pour un réseau de MxM nœuds, consiste à calculer la matrice des proportions qui approche la solution optimale et vérifie l'équation (6.6). Nous avons programmé les calculs de toutes les stragtégies afin de comparer les consommations des nœuds critiques.

Remarque 3 :

Le problème d'optimisation de la durée de vie étant défini comme un problème non linéaire avec des contraintes linéaires nous allons également présenter des résultats obtenus par la méthode de Recuit-simulé[3]*. Avec cette méthode, nous obtenons des proportions de trafic qui s'approchent du cas optimal.*

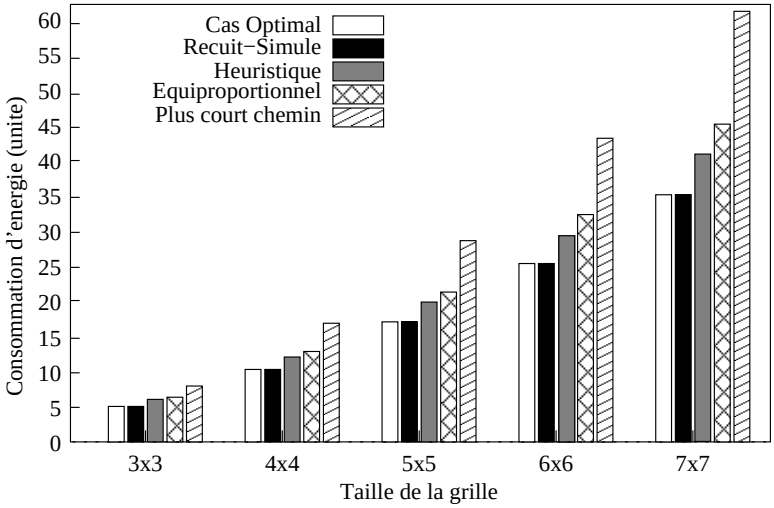


FIG. 6.9 – Énergie consommée avec 1 paquet généré par chaque nœud.

Par la suite, nous avons comparé toutes les stratégies par rapport à la solution optimale. De la figure 6.9, on note que les stratégies du plus court chemin et celle du routage équiproportionnel sont les plus consommatrices, particulièrement lorsque le nombre de nœuds est très grand.

Durée de vie

La durée de vie du réseau dans chaque stratégie peut être déduite de façon triviale à partir de la figure 6.7.1. Dans cette figure nous avons tracé l'énergie maximale consommée par un nœud dans le réseau en fonction du trafic généré λ par chacun des nœuds. Nous remarquons bien que les routages classiques ne favorisent pas la maximisation de la durée de vie du réseau. En effet, Un routage de type plus court chemin à des conséquences lourdes sur la durée de vie du réseau.

[3] Le Recuit simulé est une technique d'optimisation combinatoire utilisée afin de déterminer le minimum global de la fonction objectif. Elle s'appuie sur le phénomène de recuit dans la cristallisation [KGV83] et utilise l'algorithme de Metropolis comme optimiseur global.

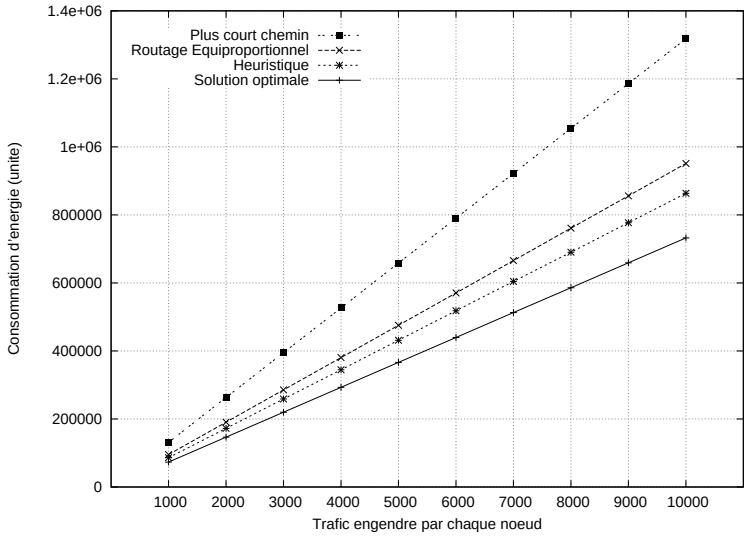


FIG. 6.10 – Énergie maximale consommée par un nœud dans une grille (10×10).

6.7 Discussion et directions futures

Les méthodes d'équilibrage d'énergie proposées optimisent la durée de vie du réseau pour deux raisons principales :

- Premièrement, il est indiqué dans le présent chapitre que le routage de données en utilisant les politiques proposées consomme moins d'énergie au niveau des nœuds critiques que les stratégies à routage optimal telles le routage équiproportionnel ou le plus court chemin mais qui ne se préoccupent que de chaque paquet individuellement.

- Deuxièmement, un contrôle optimal de routage peut aussi être associé à nos méthodes. En fait, les routes peuvent être pré-calculées une fois pour toutes par la Station de Base (cela suppose que la topologie globale du réseau est connue) et distribuées en unicast ou en broadcast à tous les nœuds du réseau . De cette manière, l'*overhead* de contrôle est réduit au minimum.

Remarque 4 :

Dans le réseau que nous avons considéré a une topologie régulière sous forme de grille, où le nombre de niveaux de puissance d'émission est limité à deux, les nœuds critiques sont ceux à proximité de la Station de Base. Ce résultat est observé dans nos résultats. En revanche, cela peut ne pas être le cas si l'on considère une topologie quelconque ou bien un trafic non uniforme.

6.7.1 Cas d'une topologie en grille avec une Station de Base au centre

La figure 6.7.1 présente le second scénario que nous avons considéré dans lequel la Station de Base est située au centre de la grille. Tel qu'il est montré dans les figures 6.12(a), 6.12(b) et 6.12(c), la charge du trafic se concentre sur les nœuds proches de la station de base et elle se distribue de façon symétrique sur les nœuds qui l'entourent. Pour schématiser les observations sur les trois figures, nous avons choisi les nœuds dépassant un certain seuil de consommation à partir des résultats de calcul.

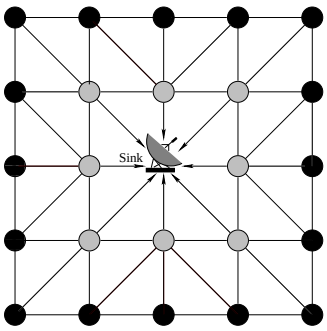
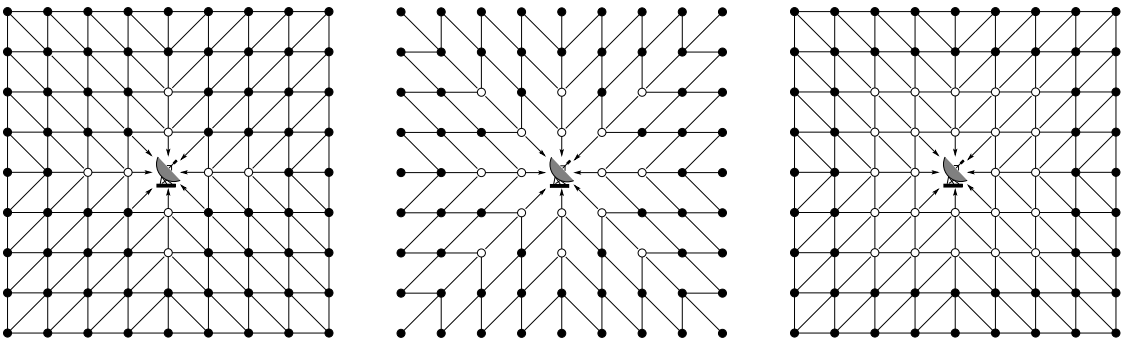


FIG. 6.11 – Réseau de capteurs avec une topologie régulière *(la Station de Base au centre)*.



(a) Routage équiproportionnel

(b) Routage de type plus court chemin

(c) Heuristique d'équilibrage de charge

FIG. 6.12 – Représentation des nœuds critiques *(nœuds en blanc)* dans le cas d'une BS au centre.

Avant de calculer la durée de vie du réseau, nous pouvons la deviner à partir de la position des nœuds critiques sur les trois figures 6.12(a), 6.12(b) et 6.12(c). En utilisant un routage équiproportionnel (Fig. 6.12(a)), la charge de trafic se concentre sur les nœuds qui sont situés sur la colonne et la ligne dont la Station de Base est le point de croisement. C'est tout à fait normal car si on décompose la grille en 4 blocs symétriques, chacun ayant la station de Base au coin, alors ces nœuds critiques sont des nœuds frontaliers de deux blocs adjacents à la fois.

Pour un routage de type plus court chemin (Fig. 6.12(b)), les nœuds positionnés sur les deux diagonales principales de la grille s'ajoutent aux nœuds précédents. Nous interprétons cela par une légère amélioration car plus le nombre de ces nœuds est grand, plus le trafic est équilibré.

Nous observons davantage d'amélioration avec l'heuristique proposée (Fig. 6.12(c)) puisque la charge est répartie sur tous les nœuds situés sur les deux couronnes autour de la Station de Base. Finalement, il s'agit bien des mêmes conclusions que font ressortir les résultats tracés dans la figure 6.13. Nous avons calculé grâce à l'implantation des algorithmes des trois stratégies, la consommation d'énergie maximale consommée par une nœud.

De façon similaire au premier scénario avec une station de base située dans le coin de la grille, nous avons construit une solution optimale pour le cas présent. L'énergie maximale consommée par les noeuds entourant la station de base dans le cas optimal s'écrit :

$$E^* = \lambda P_1 \left(\frac{3M^2 - 13}{10}\right) \tag{6.7}$$

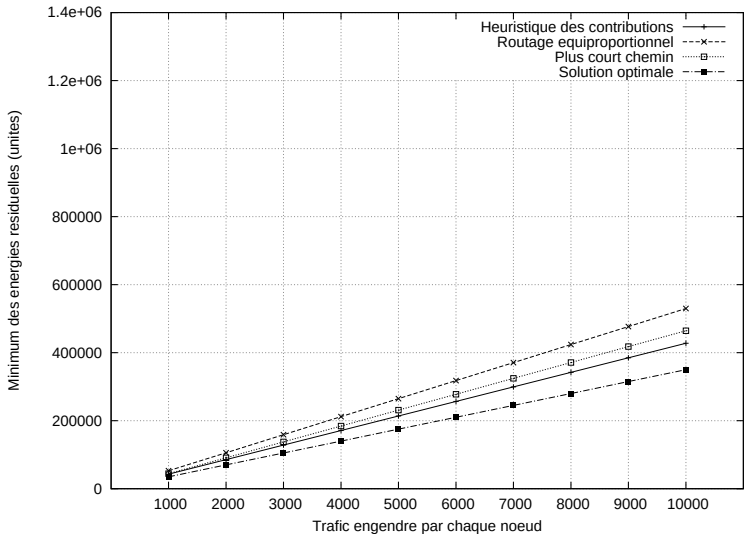


FIG. 6.13 – Énergie maximale consommée par un nœud dans une grille (11×11), BS située au centre.

Dans ce scénario, nous remarquons une fois de plus qu'un partage de charge selon la solution optimale donnera de meilleures performances en terme de durée de vie au réseau. En outre, même si l'heuristique est loin du cas optimal, les résultats lui donnent un avantage par rapport au routage de type plus court chemin ou équiproportionnel. Cela démontre qu'une prise en compte de l'hétérogénéité en terme de puissance dans le partage de charge selon les coûts, équilibre mieux la consommaion énergétique des nœuds.

Par ailleurs, nous avons gardé la même échelle entre les deux figures et 6.13 afin de souligner un résultat subsidiaire qui vient en comparant les résultats des deux figures. Nous remarquons que le réseau aura une durée de vie plus importante lorsque la station de base est au milieu de la grille.

6.7.2 Cas de topologies irrégulières

Pour des topologies irrégulières, un protocole de découverte de voisinage peut être associé à la méthode d'équilibrage de charge. Ce n'est pas optimal, mais cela reste une politique distribuée. Cette politique peut également être améliorée en utilisant une signalisation supplémentaire afin d'éviter la perte de nœuds ou bien pour détecter de nouveaux nœuds critiques, qui apparaissent pour une raison physique ou autre. Cette signalisation va permettre de calculer la proportion de messages à envoyer entre les capteurs restant disponibles.

6.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploité les observations de l'étude expérimentale du chapitre précédent dans le but de proposer des stratégies de partage de charge. Notre idée est que des protocoles très réduits et des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour un routage mieux équilibré garantissant une durée de vie du réseau plus importante. L'étude menée consiste à explorer des pistes permettant de maximiser la durée de vie d'un réseau de capteurs.

Après avoir choisi une problématique avec un scénario précis, nous avons présenté une solution optimale garantissant une longévité importante au réseau. Nous avons constaté que la solution présente des performances meilleures comparées à des algorithmes de routage classiques. Une heuristique d'équilibrage tenant compte des puissances d'émission des nœuds a été également proposée. Ces propositions ont été comparées à des mécanismes classiques tels qu'un routage "plus court chemin". L'équilibrage de charge avec l'heuristique proposée n'est pas très optimal dans le cas étudié mais peut être évalué en tenant compte des plans de signalisation additionnels.

Cette étude a montré finalement au travers d'exemples simples, la supériorité des solutions proposées par rapport à des routages classiques. Comme perspective de recherche à ce travail, nous pensons qu'il y a lieu d'étudier d'autre scénarios avec plusieurs niveaux de puissance d'émission. Nous pouvons également généraliser les méthodes présentées afin de tenir compte d'une répartition non uniforme des énergies voire des trafics à écouler. En outre, l'ensemble des mécanismes étudiés peuvent entrer dans la conception d'un protocole de routage et faire l'objet d'une étude expérimentale afin de les affiner encore. En effet, un protocole utilisant le contrôle de puissance peut être combiné avec ces mécanismes

afin d'améliorer les performances du réseau en terme de durée de vie.

Chapitre 7

Conclusions et Perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu au cours de ces dernières années un formidable essor aussi bien dans l'industrie que dans le milieu universitaire. Cela est principalement attribuable à l'ampleur sans précédent des possibilités qu'offre cette technologie. Toutefois, les réseaux de capteurs sans fil doivent aussi faire face à d'importants défis de conception en raison de leurs capacités de calcul et de stockage limitées et surtout de leur dépendance à l'égard d'une énergie limitée fournie par une batterie. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent un obstacle majeur au déploiement des réseaux de capteurs qui prétendent à l'omniprésence dans le monde de demain. Cette thèse a porté sur l'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, avec un accent particulier sur la conservation d'énergie au niveau application et par la suite au niveau routage.

Synthèse

Dans la première partie de nos travaux nous avons proposé une solution protocolaire pour des réseaux de petite taille. La solution nommée « Placide » s'inscrit dans le domaine d'application le plus répandu dans les réseaux de capteurs sans fil, le "monitoring". Elle est destinée à la surveillance de la chaîne du froid.

De part les spécificités qu'impose le contexte applicatif choisi, la solution auto-organisante adoptée consiste à ordonnancer les communications sous forme de liste doublement chaînée par la construction au préalable d'un anneau virtuel avec tous les nœuds du réseau. La solution comprend des protocoles pour la construction de la topologie, son maintien puis l'orchestration des échanges de données (alarmes, présences, ...) entre les nœuds. L'originalité première de cette solution, est due au fait qu'elle n'impose aucune infrastructure (dispositif) particulière de type Station de Base par exemple. En outre, tous les nœuds jouent ainsi un rôle identique, d'où l'absence de maillon faible dans la topologie.

Guidés par un seul objectif, réduire la consommation énergétique des nœuds afin d'augmenter la durée de vie du réseau et la durabilité de l'application, nous avons dû faire face à plusieurs formes de dissipation et de surconsommation d'énergie. « Placide » repose sur une approche de conservation

d'énergie centrée sur la réduction du *duty-cycle*. Afin d'atteindre cet objectif, le protocole d'initialisation repose sur une temporisation paramétrable permettant d'écouter le canal avant d'émettre évitant ainsi les collisions. Le protocole d'échange de données (régime permanent) repose quant à lui sur un mécanisme d'ordonnancement *sleep/wakeup* utilisant des rendez-vous planifiés entre les nœuds. Les mécanismes choisis combinés à la topologie de « Placide » garantissent un faible *duty-cycle* et permettent ainsi aux nœuds de maintenir leurs radios éteintes la plupart du temps. À travers cette solution, nous avons montré que tels mécanismes peuvent être intégrés au niveau application bien qu'ils soient souvent évoqués et implantés au niveau MAC. Ce choix nous a permet de nous affranchir de la complexité des couches basses et d'opter pour des méthodes d'accès simples.

Les performances de Placide ont été démontrées grâce à des modèles analytiques et des simulations. Les modèles nous ont permis par ailleurs de dimensionner les paramètres des protocoles pour améliorer leur robustesse et leur efficacité énergétique. En outre, nous avons démontré à l'aide d'autres mécanismes souples et d'une coordination implicite et auto-organisante que les performances de la solution en terme de conservation d'énergie peuvent être améliorées.

Les premiers retours d'expérience en laboratoire témoignent en l'état des performances de « Placide » en terme d'auto-organisation, d'économie d'énergie et de facilité de déploiement.

La seconde partie de la thèse a été consacrée au routage à l'économie dans les réseaux de capteurs sans fil de grande taille. Cette idée tient son origine d'une série d'expérimentations réelles, menées dans le but d'étudier la qualité du lien et son impact sur des aspects topologiques du réseau. Durant ces expérimentations nous avons analysé la variation de la qualité du lien en fonction du temps, la puissance de transmission et la distance entre les nœuds dans des modèles de trafic de type "tous-vers-un".

Nous avons remarqué, dans certaines conditions, qu'avec des puissances d'émission pas forcément élevées nous arrivons tout de même á obtenir une qualité du lien respectable. Cette qualité obtenue garantit par ailleurs un taux moyen de réception raisonnable et maintient au mieux la topologie du réseau. En revanche, construire des solutions de routage fondées sur la qualité du lien, dans un modèle de trafic "tous-vers-un" est lourd de conséquences. Les nœuds ayant une bonne qualité du lien avec la station de base ou étant plus proches d'elle, sont les plus sollicités pour acheminer les données. Cela augmente leur vulnérabilité puisqu'ils sont amenés à consommer plus d'énergie et à s'épuiser rapidement. Ces observations nous ont permis de penser à des solutions de routage à l'économie par partage de charge. C'est l'objet de la dernière étude de ce manuscrit.

Le partage de charge que nous avons proposé a l'avantage d'équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds assurant ainsi une durée de vie plus importante au réseau. Notre idée est que des protocoles moins lourds en signalisation et des mécanismes simples peuvent être mis en œuvre pour

le routage. Nous avons alors combiné la possibilité d'avoir plusieurs niveaux de puissance d'émission avec la contrainte d'énergie sur les nœuds critiques afin de partager la charge du trafic dans le cas de topologies régulières. Une solution optimale est alors déterminée et des mécanismes sans signalisation sont proposés. Nous avons également vérifié la supériorité de ces mécanismes par rapport à des routages classiques tels que le routage de type plus court chemin.

Perspectives

Les travaux que nous avons effectués dans cette thèse nous ouvrent de nombreuses perspectives de recherche. Nous les structurons nos réflexions comme suit :

- La première phase concerne la solution « Placide ». à ce jour nous ne disposons toujours pas de moyens efficaces pour évaluer la consommation exacte des protocoles même si nous voulons la déduire par l'état de la batterie. Par conséquent, nous pensons que les modèles peuvent être affinés davantage grâce à des expérimentations et des mesures réelles. En effet, cela nous permettra de déceler et de comprendre au mieux les aléas du support afin d'en tenir compte dans les modèles d'énergie. Une seconde perspective pour « Placide » est son extention pour d'autres configurations dans lesquelles les nœuds ne sont pas à portée les uns des autres.
- D'autre déploiements de réseaux de capteurs dans des environnements variés peuvent rendre l'étude expérimentale encore plus passionnante, ils apporteront de riches enseignements pour le développement de modèles exacts et le dimensionnement de protocoles. En vue de l'arrivée massive des réseaux urbains et domotiques, des études de cohabitation avec d'autre normes seront du plus grand intérêt pour la fiabilité et la robustesse des futures solutions.
- Concernant le routage à l'économie, nous pensons que c'est une problématique attrayante aussi bien d'un point de vue théorique que pratique. Les premiers résultats de nos mécanismes d'équilibrage de charge nécessitent une consolidation par des expérimentations afin d'étayer les hypothèses que nous avons retenues. D'autres études avec des scénarios diversifiés nous semblent intéressantes. Il y a lieu de considérer des réseaux avec des topologies irrégulières, des nœuds avec des portées plus importantes, ...
- De part les observations sur le partage de charge, nous pensons que la combinaisons des stratégies étudiées avec des techniques d'agrégations, de réduction de données ou de *data-gathering* apportera des gains considérables en terme d'économie d'énergie.
- En dernier, nous envisageons également de généraliser les méthodes présentées afin de tenir compte d'une répartition non uniforme des énergies voire des trafics à écouler, ainsi que d'autres aléas tels que les pannes potentielles de capteurs, etc.

- Notre conclusion principale est que tout part de l'application et par conséquent les perspectives pourraient porter également sur d'autres scénarios applicatifs de types "Mostly-on" par exemple.

Liste des communications

Conférences internationales avec comité de lecture

- Monique Becker, André-Luc Beylot, Riadh Dhaou, Ashish Gupta, Rahim Kacimi, Michel Marot. *"Experimental Study : Link Quality and Deployment Issues in Wireless Sensor Networks"*, IFIP Networking, Aix-la-Chapelle, 11/05/2009-15/05/2009, Springer, LNCS 5550, p. 14-25, mai 2009.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Using energy-efficient wireless sensor network for cold chain monitoring"*, IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2009), Las Vegas, Nevada, USA, 10/01/2009-13/01/2009, IEEE, p. 1-5, janvier 2009.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Energy-aware self-organization algorithms for wireless sensor networks"*, IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2008), La Nouvelle Orléans, 30/11/2008-04/12/2008, IEEE, p. 1-5, décembre 2008.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Placide : An Ad Hoc Wireless Sensor Network for Cold Chain Monitoring"*, International Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NET 2008), Karlskrona, Sweden, 18/02/2008-20/02/2008, University of Karlskrona, (support électronique), février 2008.

Contributions à des ouvrages de synthèse

- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Placide : Ad Hoc Wireless Sensor Network for Cold Chain Monitoring"*, Performance Modelling and Analysis of Heterogeneous Networks. Demetres Kouvatsos (Eds.), River Publishers, 8, p. 153-168, mars 2009.

Séminaires et workshop nationaux

- André-Luc Beylot, Rahim Kacimi, Riadh Dhaou. *"Placide : une solution protocolaire pour le suivi de la chaîne du froid à l'aide d'un réseau de capteurs"*, Dans : Workshop Réseaux Autonomes et Spontanés, Paris, 30/10/07-31/10/07 (conférencier invité), Institut TELECOM, Actes de l'Institut Télécom, p. 51-55, septembre 2008.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Placide : Un protocole applicatif pour le suivi de la chaîne du froid"*, Dans : Journées du Pôle RESCOM-GDR ASR, Toulouse, 20/09/07-21/09/07, *http ://irt.enseeiht.fr/beylot/rescomPROG.html*.

Rapports

- Kamal Gakhar, Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Agrégation de données dans les réseaux de capteurs : Livrable 3.1"*, Rapport de recherche, 2007-03-02, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Capteurs : Spécifications de l'architecture réseau"*, Rapport de contrat, 2007-03-01, Institut National Polytechnique de Toulouse, mars 2007.
- Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. *"Capteurs : Etat de l'art : Livrable 1.1"*, Projet RNRT Capteurs. Rapport de contrat, IRT-06-07-01, Institut National Polytechnique de Toulouse, juillet 2006.

Bibliographie

[AAG+07] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri. Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'07)*, pages 1–6, Pisa, Italy, October 2007. 14, 29

[ABC+05] Giuseppe Anastasi, Eleonora Borgia, Marco Conti, Enrico Gregori, and Andrea Passarella. Understanding the real behavior of mote and 802.11 ad hoc networks : An experimental approach. *Pervasive and Mobile Computing*, 1(2) :237–256, 2005. 25

[ABJ08] Mahmood Ali, Annette Böhm, and Magnus Jonsson. Wireless sensor networks for surveillance applications - A comparative survey of MAC protocols. In *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC '08)*, pages 399–403, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society. 14

[ACFP09] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3) :537–568, 2009. 22, 87

[ACPP08] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Andrea Passarella, and Luciana Pelusi. Mobile-relay forwarding in opportunistic networks. In M. Ibnkahla, editor, *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*. CRC Press, New York, USA, 2008. 31

[AMC07] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51(4) :921–960, 2007. 29

[AMS99] Glenn O. Allgood, Wayne W. Manges, and Stephen F. Smith. It's time for sensors to go wireless. *Sensors Magazine*, April 1999. 12

[Arm05] Trevor Armstrong. Wake-up based power management in multi-hop wireless networks, 2005. Term Survey Paper, University of Toronto, available at http ://www.eecg.toronto.edu/ trevor/Wakeup/index.html. 23

[ASSC02a] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8) :102–114, August 2002. 5, 7

[ASSC02b] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4) :393–422, 2002. 5, 6, 7, 20

[AYY02] Khaled A. Arisha, Moustafa A. Youssef, and Mohamed F. Younis. Energy-Aware TDMA-based MAC for Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT'02)*, New York City, NY, 2002. 24

[BBD+09] Monique Becker, André-Luc Beylot, Riadh Dhaou, Ashish Gupta, Rahim Kacimi, and Michel Marot. Experimental study : Link quality and deployment issues in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 8th International IFIP-TC6 Networking Conference (NETWORKING'09)*, volume 5550, pages 14–25, Aachen, Germany, 2009. Springer. 31, 88

[BC01] Manish Bhardwaj and Anantha Chandrakasan. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'01)*, Helsinki, Finland, 2001. 21, 87

[BC02] Manish Bhardwaj and Anantha P. Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor network via optimal role assignments. In *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '02)*, volume 3, pages 1587–1596, New York, USA, June 2002. 21, 87

[BGGT07] Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Golatowski, and Dirk Timmermann. Weighted centroid localization in zigbee-based sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP'07)*, pages 1–6, Alcala de Henares, Spain, October 2007. 67

[BS02] Douglas M. Blough and Paolo Santi. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'02)*, pages 183–192, New York, NY, USA, 2002. ACM. 21, 87

[CC00] CC2420 Radio, http ://www.chipcon.com, 2000. 66, 68

[CCMN02] Carla-Fabiana Chiasserini, Imrich Chlamtac, Paolo Monti, and Antonio Nucci. Energy efficient design of wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 2nd International IFIP-TC6 Networking Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols ; Performance of Computer and Communication Networks ; and Mobile and Wireless Communications (NETWORKING'02)*, pages 376–386, London, UK, 2002. Springer-Verlag. 20

[CE04] Alberto Cerpa and Deborah Estrin. Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3) :272–285, 2004. 20

[CES04] David Culler, Deborah Estrin, and Mani Srivastava. Guest editors' introduction : Overview of sensor networks. *Computer*, 37(8) :41–49, August 2004. 5, 6

[CGVC06] Bogdan Cărbunar, Ananth Grama, Jan Vitek, and Octavian Cărbunar. Redundancy and coverage detection in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2(1) :94–128, 2006. 21

[CSA03] Arnab Chakrabarti, Ashutosh Sabharwal, and Behnaam Aazhang. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03)*, pages 129–145, Palo Alto, CA, USA, 2003. 31

[CT00] Jae-Hwan Chang and Leandros Tassiulas. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00)*, volume 1, pages 22–31, Tel-Aviv, Israel, 2000. 20

[CTLW05] Mihaela Cardei, My T. Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05)*, volume 3, pages 1976–1984, Miami, USA, March 2005. 21

[CW04] Mihaela Cardei and Jie Wu. Coverage in wireless sensor networks. In Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, editors, *Handbook of Sensor Networks*. CRC Press, West Palm Beach, FL, 2004. 21

[CZ05] Yunxia Chen and Qing Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 9(11) :976–978, November 2005. 21

[DD09] Isabel Dietrich and Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 5(1) :1–39, 2009. 19

[DE06] Maarten Ditzel and Frans H. Elferink. Low-power radar for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd European Radar Conference (EuRAD'06)*, pages 139–141, Manchester, UK, September 2006. 29

[DEA06] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. MAC protocols for wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :115–121, April 2006. 24

[DHHV05] Jing Deng, Yunghsiang S. Han, Wendi B. Heinzelman, and Pramod K. Varshney. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) :825–835, 2005. 20

[DML02] Enrique J. Duarte-Melo and Mingyan Liu. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom'02)*, Taipei, Taiwan, 2002. 87

[Fal07] Dressler Falko. *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. John Wiley & Sons, December 2007. 57

[FML09] Gwillerm Froc, Issam Mabrouki, and Xavier Lagrange. Design and performance of wireless data collection networks based on unicast random walk routing. *IEEE-ACM Transactions on Networking*, 2009. 89

[FRWZ07] Elena Fasolo, Michele Rossi, Jörg Widmer, and Michele Zorzi. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey. *IEEE Wireless Communications*, 14(2) :70–87, April 2007. 29

[GK05] Arvind Giridhar and P. R. Kumar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, page 2, Piscataway, NJ, USA, 2005. IEEE Press. 20

[GSSI07] V. Cagri Gungor, Chellury Sastry, Zhen Song, and Ryan Integlia. Resource-aware and link quality based routing metric for wireless sensor and actor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*, pages 3364–3369, Glasgow, Scotland, June 2007. 67

[Haa00] Jaap C. Haartsen. The bluetooth radio system. *IEEE Personal Communications*, 7(1) :28–36, February 2000. 24

[Hae03] Martin Haenggi. Energy-balancing strategies for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits And Systems (ISCAS'03)*, volume 4, Bangkok, Thailand, May 2003. 87

[HAH06] Matthew M. Holland, Ryan G. Aures, and Wendi B. Heinzelman. Experimental investigation of radio performance in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh'06)*, pages 140–150, Reston, Virginia, USA, 2006. 79

[HC06] Keith Hellman and Michael Colagrosso. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of Interconnection Networks*, 7(1) :91–99, 2006. 20

[HCB00] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the*

33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00), volume 2, pages 3005–3014, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society. 17, 24, 25

[HW05] K. Holger and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2005. 5, 6, 7, 14, 20, 21

[IEE03] Ieee standard for information technology part 15.4 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification for low rate wireles personal area networks (LR-WPANs), 2003. 12, 26, 36, 56, 67, 68

[JP07] Li Jian and Mohapatra Prasant. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 3(3) :233–254, 2007. 31, 87

[KAL05] Santosh Kumar, Anish Arora, and Ten .H. Lai. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS'05)*, pages 186–188, Washington, DC, USA, November 2005. 21

[KGV83] S Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598) :671–680, May 1983. 102

[KM08] M. Khan and J. Misic. On the lifetime of wireless sensor networks. In Y. Zhang, J. Zheng, and H. Hu, editors, *Wireless Networks and Mobile Communications*, volume 6, Boca Raton, FL, 2008. Auerbach Publications, CRC Press. 19

[Kri06] Bhaskar Krishnamachari. *Networking Wireless Sensors*. Cambridge University Press, 2006. 1, 5, 10

[KRSP05] Aman Kansal, Aditya Ramamoorthy, Mani B. Srivastava, and Gregory J. Pottie. On sensor network lifetime and data distortion. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'05)*, pages 6–10, Adelaide, Australia, September 4-9 2005. 21

[Lan08] Koen Langendoen. Medium access control in wireless sensor networks. In Hongyi Wu and Yi Pan, editors, *Medium Access Control in Wireless Networks*, pages 535–560. Nova Science Publishers, May 2008. 24

[LM07] Jian Li and Prasant Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 3(3) :233–254, 2007. 21

[LMH+03] Dhananjay Lal, Arti Manjeshwar, Falk Herrmann, Elif Uysal-Biyikoglu, and Abtin Keshavarzian. Measurement and characterization of link quality metrics in energy constrained wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications conference (GLOBECOM'03)*, volume 1, pages 446–452, San Francisco, USA, December 2003. 67, 79

[LWY+05] Hai Liu, Peng-Jun Wan, Chih-Wei Yi, Xiaohua Jia, S. A. M. Makki, and Niki Pissinou. Maximal lifetime scheduling in sensor surveillance networks. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05)*, volume 4, pages 2482–2491, Miami, USA, March 2005. 21

[LYH06] Yuan Li, Wei Ye, and John Heidemann. Energy efficient network reconfiguration for mostly-off sensor networks. In *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'06)*, volume 2, pages 527–535, Reston, VA, USA, September 2006. 13

[Mas06] Pierre Maslo. Sondes de choc, 2006. 6

[MC02] Rex Min and Anantha Chandrakasan. A framework for energy-scalable communication in high-density wireless networks. In *Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED'02)*, pages 36–41, Monterey, CA, USA, 2002. 91

[MCP+02] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and John Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, pages 88–97, New York, NY, USA, 2002. ACM. 11

[MQW05] Wei Mo, Daji Qiao, and Zhengdao Wang. Mostly-sleeping wireless sensor networks : Connectivity, k-coverage, and alpha-lifetime. In *Proceedings of the the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, USA, 2005. 21

[MRK+05] Vivek P. Mhatre, Catherine Rosenberg, Daniel Kofman, Ravi Mazumdar, and Ness Shroff. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(1) :4–15, January-February 2005. 20

[PB05] Christian Prehofer and Christian Bettstetter. Self-organization in communication networks : principles and design paradigms. *IEEE Communications Magazine*, 43(7) :78–85, July 2005. 57

[PB09] Hurni Philipp and Torsten Braun. Calibrating wireless sensor network simulation models with real-world experiments. In *Proceedings of the 8th International IFIP-TC6 Networking Conference (NETWORKING'09)*, volume 5550, pages 1–13, Singapore, May 5-6 2009. Springer. 14, 36

[PHC04] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'04)*, pages 95–107, New York, NY, USA, 2004. ACM. 25

[PK00] Gregory J. Pottie and W. J. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, 2000. 14

[PSC05] Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and David Culler. Telos : Enabling ultra-low power wireless research. In *Proceedings of 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, pages 364–369, Los Angeles, CA, USA, 2005. 67

[Rap06] Theodore Rappaport. Wireless communications : Principles and practice. *Publishing House of Electronics Industry*, 2006. 91

[RGS06] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :108–114, April 2006. 29, 30

[ROGLA03] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys '03)*, pages 181–192, New York, NY, USA, 2003. ACM. 24

[RSPS02] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2) :40–50, March 2002. 2, 13, 14, 22

[RWA+08] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L. Sichitiu. Z-MAC : a hybrid MAC for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3) :511–524, 2008. 25, 27

[SCI+01] Eugene Shih, Seong-Hwan Cho, Nathan Ickes, Rex Min, Amit Sinha, Alice Wang, and Anantha Chandrakasan. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th annual international con-*

ference on Mobile Computing and networking (MobiCom'01), pages 272–287, New York, NY, USA, 2001. ACM. 2

[SDTL06] Kannan Srinivasan, Prabal Dutta, Arsalan Tavakoli, and Philip Levis. Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'06)*, Boulder, Colorado, USA, 2006. 67

[Sen99] DARPA IPTO, SensIT : Sensor Information Technology program, 1999. 11

[SH05] Stanislava Soro and Wandi B. Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In *Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05)*, Denver, Colorado, USA, April 2005. 20

[SHC+04] Victor Shnayder, Mark Hempstead, Bor-rong Chen, Geoff Werner Allen, and Matt Welsh. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications. In *Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'04)*, pages 188–200, Baltimore, Maryland, USA, 2004. ACM. 60

[SIM92] SIMULOG. Qnap2 user's manual, 1992. 48

[SJZ06] Ines Slama, Badii Jouaber, and Djamal Zeghlache. Routing for wireless sensor networks lifetime maximisation under energy constraints. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Technology, Applications & Systems (Mobility'06)*, page 8, New York, NY, USA, 2006. ACM. 89

[SKH06] Dongjin Son, Bhaskar Krishnamachari, and John Heidemann. Experimental analysis of concurrent packet transmissions in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'06)*, pages 237–249, Boulder, Colorado, USA, November 2006. ACM. 67

[SL06] Kannan Srinivasan and Philip Levis. RSSI is under appreciated. In *In Proceedings of the 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets'06)*, Cambridge, MA, USA, 2006. 68

[SMJ02] Coleri Sinem, Ergen Mustafa, and Koo T. John. Lifetime analysis of a sensor network with hybrid automata modelling. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, pages 98–104, New York, NY, USA, 2002. ACM. 87

[SS05] Kewei Sha and Weisong Shi. Modeling the lifetime of wireless sensor networks. *Sensor Letters*, 2005. 21

[STS02] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM : Topology management for energy efficient sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, volume 3, pages 78–89, Big Sky, Montana, USA, 2002. 23

[TAGH02] Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2) :28–36, 2002. 12, 21

[Tan02] Andrew Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002. 42

[TC05] Gilman Tolle and David Culler. Design of an application-cooperative management system for wireless sensor networks. In *Proceeedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'05)*, pages 121–132, Istanbul, Turkey, February 2005. 68

[TG02] Di Tian and Nicolas D. Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, pages 32–41, New York, NY, USA, 2002. ACM. 20, 21

[TML04] TinyOs MultiHopLQI routing algorithm, 2004. http ://www.tinyos.net/tinyos-1.x/tos/lib/MultiHopLQI. 66, 68, 80

[Tmo06] Tmote sky datasheet, Moteiv Corporation, 2006. 48, 49, 66

[TOS01] TinyOS, 2001. http ://www.tinyos.net/. 25, 60, 66

[TR04] Caimu Tang and Cauligi S. Raghavendra. Compression techniques for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Networks*, pages 207–231, 2004. 29

[VAA04] Mehmet C. Vuran, Özgür B. Akan, and Ian F. Akyildiz. Spatio-temporal correlation : theory and applications for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 45(3) :245–259, 2004. 28

[vL03] Tijs van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pages 171–180, New York, NY, USA, 2003. ACM. 26

[WALW+06] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, Omar Marcillo, Jeff Johnson, Mario Ruiz, and Jonathan Lees. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, 10(2) :18–25, 2006. 29

[WGLX05] Kui Wu, Yong Gao, Fulu Li, and Yang Xiao. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) :837–852, 2005. 21

[WLFH07] Sally K. Wahba, Keith D. LaForce, John L. Fisher, and Jason O. Hallstrom. An empirical evaluation of embedded link quality. In *Proceedings of the 2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'07)*, pages 430–435, Washington, DC, USA, October 2007. IEEE Computer Society. 67, 79

[WSC05] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'05)*, pages 270–283, New York, NY, USA, 2005. ACM. 20

[XHE01] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'01)*, pages 70–84, New York, NY, USA, 2001. ACM. 13

[XRC+04] Ning Xu, Sumit Rangwala, Krishna Kant Chintalapudi, Deepak Ganesan, Alan Broad, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. A wireless sensor network for structural monitoring. In *Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'04)*, pages 13–24, New York, NY, USA, 2004. ACM. 12

[XWZ+05] Guoliang Xing, Xiaorui Wang, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 1(1) :36–72, 2005. 21

[YH04] Wei Ye and John Heidemann. Medium access control in wireless sensor networks. In Krishna Sivalingam Ty Znati C. S. Raghavendra, editor, *Wireless Sensor Networks*, pages 73–92. Kluwer Academic Publishers, 2004. 24

[YHE04] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) :493–506, 2004. 14, 16, 26

[ZG03] Jerry Zhao and Ramesh Govindan. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked Sensor Systems (SenSys '03)*, pages 1–13, New York, NY, USA, 2003. ACM. 67

[ZH05a] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2), 2005. 21

[ZH05b] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. Maximizing α-lifetime for wireless sensor networks. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Measurement, Modeling, and Performance Analysis of Wireless Sensor Networks (SenMetrics'05)*, 1, 2005. 21

[ZH05c] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. On the upper bound of α-lifetime for large sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 1(2) :272–300, 2005. 21

[ZHS03] Rong Zheng, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks. In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking & computing (MobiHoc'03)*, pages 35–45, New York, NY, USA, 2003. ACM. 24

[Zig05] Zigbee Alliance, Zigbee Specifications, April 2005. 12, 36

Annexe A

Détails des protocoles de la solution « PLACIDE »

A.1 Automates de protocoles

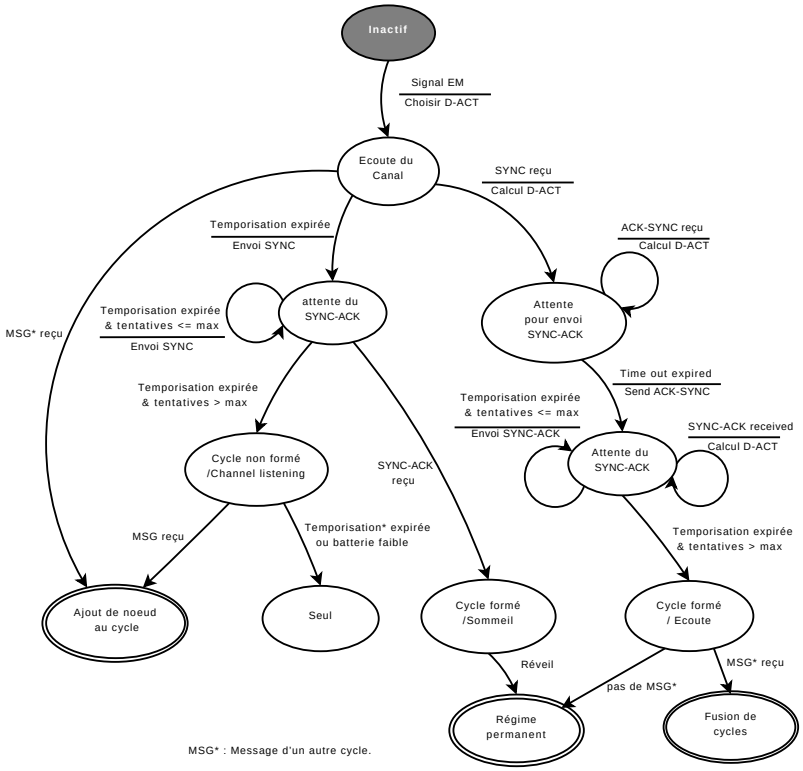


Fig. A.1 – Automate d'initialisation.

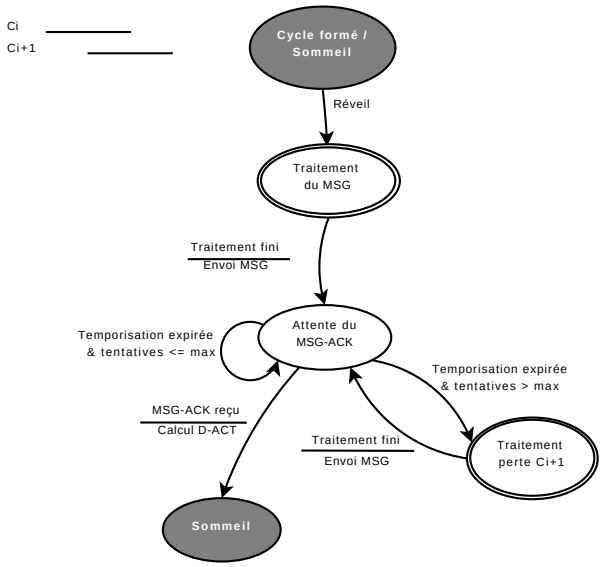


FIG. A.2 – Régime permanent pour le premier capteur de la chaîne.

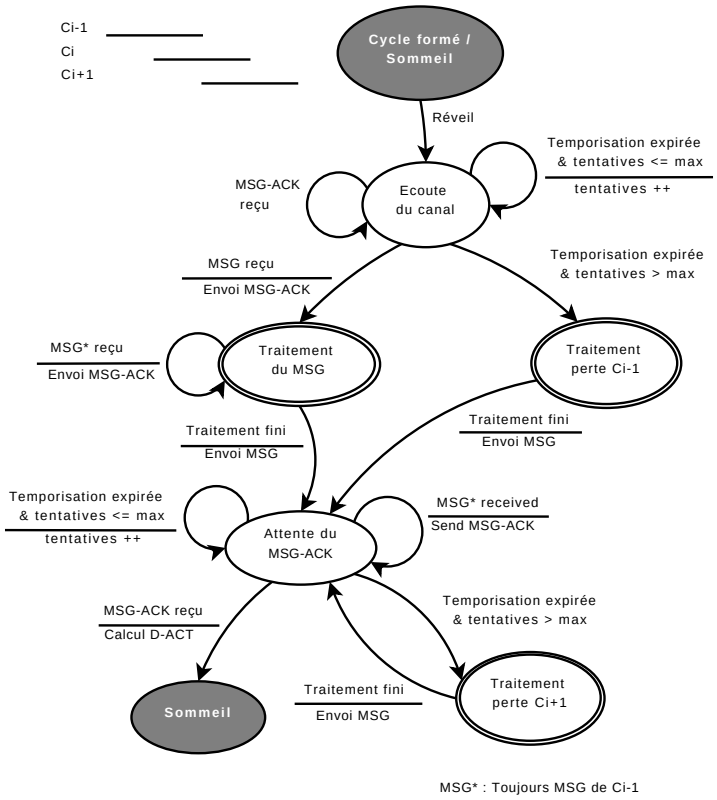


FIG. A.3 – Régime permanent pour un capteur dans la chaîne.

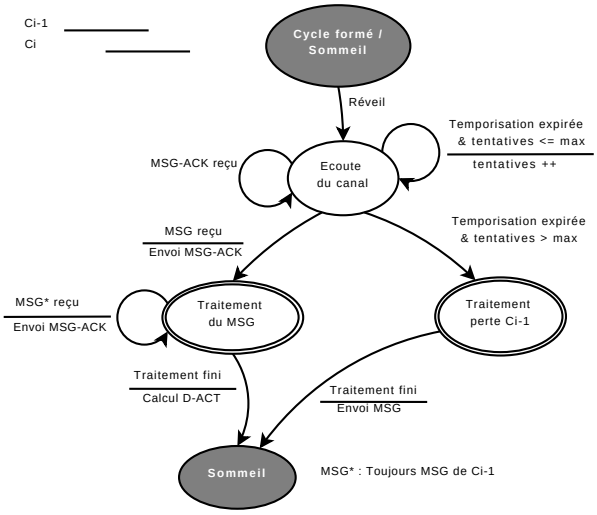


FIG. A.4 – Régime permanent pour le dernier capteur de la chaîne.

Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil

Résumé : Les progrès technologiques réalisés ces dernières années ont permis le développement de nouveaux types de capteurs dotés de moyens de communication sans fil, peu onéreux et pouvant être configurés pour former des réseaux autonomes. Les domaines d'application sont nombreux : domotique, santé, domaine militaire ou bien encore surveillance de phénomènes environnementaux. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie. La liberté laissée à l'implantation est forte et impose de concevoir complètement l'infrastructure, les mécanismes et les protocoles en fonction de l'application visée.

Dans cette thèse, nous nous sommes tout d'abord focalisés sur des réseaux de petites tailles. Nous avons conçu une solution protocolaire "Placide" pour le suivi de la chaîne du froid proposée dans le cadre du projet ANR-CAPTEURS. L'originalité première de la solution repose sur l'absence d'infrastructure et de Station de Base. Elle est composée de protocoles performants fondés sur la formation d'un anneau virtuel entre les noeuds, auto-organisants et très économes en énergie. Le second axe est dédié à une étude expérimentale de la qualité du lien. L'objectif est double. Nous souhaitions tout d'abord étayer certaines hypothèses effectuées dans la première partie du travail. Il s'agissait ensuite de proposer des protocoles et des algorithmes fondés sur la qualité du lien. Nous nous sommes focalisés sur la variation de la qualité du lien en fonction de la distance entre les noeuds et de la puissance de transmission. Par la suite, l'impact de la qualité du lien sur la topologie du réseau a été étudiée. Les retours d'expérience sont importants quant à la compréhension des facteurs affectant la durée de vie du réseau.

La dernière contribution concerne l'exploitation de ces observations en proposant des stratégies de partage de charge. Notre idée est que des protocoles très réduits et des mécanismes simples peuvent être mis en oeuvre pour le routage. Nous illustrons ces principes au travers d'exemples pour lesquels nous montrons la supériorité de ces solutions par rapport à des routages de type plus court chemin.

Energy conservation techniques for wireless sensor networks

Abstract: Technological advances during the last few years allowed the development of new and cheap sensors equiped with wireless communication which can be configured to form autonomous networks. The application areas for wireless sensor networks *(WSN)* are various: home automations, health care services, military domain, and environment monitoring. The imposed constraints are limited capacity of processing, storage, and especially energy. In addition, implementing *WSN* solutions is highly open and requires that the infrastructure, the mechanisms and the protocols should be completely designed based on each specific application.

In this thesis, we first focused on small networks. We designed *"Placide"*, a protocol stack solution for cold chain monitoring proposed within the ANR-CAPTEURS project. The first originality of this solution is based on the absence of infrastructure and base stations. *"Placide"* is composed of self-organizing and energy-efficient protocols based on a virtual ring construction between nodes. The second topic is devoted to an experimental study on Link Quality Indicator *(LQI)*. There are two main objectives. Firstly, we want to endorse our precise assumptions of the first part of the work. Secondly, our poposed link quality based protocols and algorithms will be described. We focused on *LQI* variations according to distance between nodes and transmission power. Thereafter, the impact of *LQI* on the network topology has been studied. Feedbacks are important to understand which factors affect the network lifetime.

The last contribution relates to the use of these observations by proposing load balancing strategies. Our idea is that very reduced protocols and simple mechanisms can be used in routing protocols. We illustrate these principles through simple examples where we show the superiority of these solutions compared to standard routing like shortest path for example.