



Université
de Toulouse

THÈSE

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

Délivré par :
Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)

Discipline ou spécialité :
Réseaux et Télécommunications

Présentée et soutenue par :
Youssef ZATOUT

le : 07 Juillet 2011

Titre :

" Conception et évaluation de performances d'un réseau de capteurs sans fil
hétérogène pour une application domotique "

Ecole doctorale :
Génie Electrique, Electronique et Télécommunications (GEET)

Unité de recherche :
LATTIS / LAAS-CNRS

Directeur(s) de Thèse :
M. Eric CAMPO, Professeur des universités, LAAS-CNRS
M. Jean-François LLIBRE, Maître de Conférences, LAPLACE

Rapporteurs :
M. Congduc PHAM, Professeur des universités, Laboratoire LIUPPA, Pau
M. Jean-pierre THOMESSE, Professeur des universités, ENSEM-INPL, Nancy

Autre(s) membre(s) du jury

M. Xavier LAGRANGE, Professeur des universités, Télécom Bretagne, Cesson-Sevigne
M. Thierry GAYRAUD, Professeur des universités, LAAS-CNRS
M. Daniel ESTEVE, Directeur de Recherches Emérite, LAAS-CNRS

**Conception et évaluation de performances d'un réseau de capteurs sans fil
hétérogène pour une application domotique**

par

Youssef ZATOUT

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

Toulouse, France

Juillet, 2011

LATTIS / LAAS-CNRS

« A mes parents, mes frères et mes sœurs... »

Remerciements

Je remercie vivement Monsieur le Professeur *Eric Campo*, chef de département GIM (Génie Industriel et Maintenance) de l'IUT de Blagnac et directeur de ma thèse. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour l'excellence de son accompagnement ainsi que pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordées. Je lui suis reconnaissant pour sa disponibilité, pour mon intégration au niveau de la recherche et de l'enseignement et pour ses conseils tant sur le plan technique que humain aux cours de ces trois années et demi de thèse.

J'exprime également ma gratitude à Monsieur *Jean-françois Llibre*, Maître de conférences et co-encadrant de ma thèse. Je le remercie vivement pour ses conseils pertinents ainsi que pour sa présence et son soutien moral dans les moments de stress et de doutes tout au long de la thèse.

Je remercie chaleureusement Messieurs les Professeurs *Congduc Pham* et *Jean-pierre Thomesse* pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à mes travaux en acceptant de les rapporter et de participer au jury de soutenance. Je remercie également Messieurs les professeurs *Xavier Lagrange*, *Thierry Gayraud* pour leur gentillesse et pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse. Je remercie également Monsieur *Daniel Estève*, Directeur de Recherche Emérite, d'avoir accepté de se rendre disponible pour le jury de soutenance.

Je veux également remercier tous les membres du laboratoire de l'équipe OLC et N2IS du LAAS et IRT de l'IRIT pour leur encouragement et pour la sympathie qu'ils m'ont témoigné : *Thierry Val*, *Thierry Villemur*, *Guy Juanole*, *Adrien Van den Bossche* et *Fabrice Peyrard*. Je remercie M. *Rahim Kacimi*, Maître de conférences (IRIT-UPS) pour ses conseils et son aide. Je remercie également les doctorants, post-doctorants et stagiaires qui ont contribué à l'excellente atmosphère du laboratoire LATTIS de l'IUT de Blagnac : *Réjane*, *Juan*, *Chaymaa*, *Hamida*, *Linqing*, *Yoann*, *Salim*, *Adel*, *Fayçal*, *Nicolas*, *Afshine*, ... Je remercie particulièrement mon collègue *Abdelaziz El Fatni* pour ses conseils, pour sa gentillesse et pour son aide précieuse. Je le remercie pour les discussions et les échanges ainsi que de m'avoir témoigné son amitié et son soutien tout au long de cette thèse.

Je remercie chaleureusement le personnel enseignant, technique et administratif de l'IUT de Blagnac, pour l'aide apportée lors de mon intégration dans le milieu de l'enseignement en tant que moniteur et ATER.

Je remercie également mes copains de Toulouse : *Salah*, *Lamine*, *Hamza*, *Mohammed*, *Walid* et *Hakim* mes amis du « bled » : *Rafik* et *Youness*.

Je remercie profondément ma famille : plus particulièrement mes parents auquel je dédie ce travail, frères, sœurs, grands parents, oncle, tantes et cousins pour leur soutien et leur aide malgré le peu de temps que j'ai pu leur consacrer.

Je remercie très affectueusement ma future femme *Manel* pour son soutien, ses encouragements ainsi que sa confiance malgré la distance qui nous a séparés.

À vous tous merci !

Résumé

Les progrès technologiques permettent aujourd'hui l'intégration à bas coût d'objets multi-capteurs hétérogènes communicants sans fil notamment pour la surveillance dans les environnements considérés à risques ou non accessibles. Le but de ces travaux de thèse est de contribuer à la sécurisation des personnes et de leur environnement de vie par la mise en réseau de dispositifs multi-capteurs de mesures sans fil. Ceux-ci doivent être spécifiés et configurés pour rendre par exemple l'environnement qu'ils surveillent intelligent et sécurisé. Le travail effectué porte sur la conception et le prototypage réel d'un réseau composé de dispositifs hétérogènes autonomes en énergie. Nos contributions comportent trois volets essentiels :

Le premier volet concerne la conception d'un modèle de réseau ambiant adapté : nous avons proposé un modèle qui repose sur une architecture multi-niveaux caractérisée par des nœuds hétérogènes dont le captage (détection), le traitement et le stockage des données sont distribués par niveau. Cette architecture hiérarchique offre plusieurs avantages par rapport aux architectures linéaires classiques en termes d'évolutivité, de faible coût, de meilleure couverture, de hautes fonctionnalités et de fiabilité. Nous avons défini le comportement adapté pour chaque nœud dans le modèle et montré l'avantage de la solution par la simulation.

Le deuxième volet concerne la proposition originale d'un protocole d'accès au médium efficace en énergie nommé « *T-TMAC* » et adapté à l'application, permettant d'organiser les échanges des messages dans l'architecture du réseau retenu. L'originalité du protocole est qu'il est composé de mécanismes de maintenance performants permettant la gestion de la mobilité et la reconfiguration du réseau (ajout et suppression d'un capteur). Pour cela, une adaptation et un paramétrage du standard IEEE 802.15.4 sont proposés.

Le dernier volet présente l'évaluation et l'analyse de performances du protocole développé dans le cadre de scénarios de tests. Nous avons étudié en particulier l'impact de la taille des données et la périodicité de transfert sur l'énergie et le délai. Le protocole est validé à l'aide d'un modèle analytique dont les résultats ont été comparés à ceux obtenus par prototypage matériel.

Abstract

Today technological advances allow low-cost deployment of wireless heterogeneous sensors in specific environments such as those considered risky or not accessible. The aim of this thesis is to contribute to the application of Wireless Sensor Networks (WSN) for health-care monitoring. Currently the integrated sensors must be specified and configured to make the monitored environment intelligent and secured. Our work focuses on the design of this network and the prototyping of the real devices that constitute it. Our contributions include three key components:

The first part concerns the design of an ambient adapted network: we proposed a model based on a network architecture characterized by multiple tiers with heterogeneous nodes distributed: sensing, processing and data storage. This architecture offers more advantages than classical single tier architecture in terms of scalability, low cost, coverage, functionality and reliability. We have defined the appropriate behavior for each node in this network model and we showed the advantages of our solution through simulation.

The second part deals with the proposition of an energy efficient medium access protocol named "*T-TMAC*": the protocol is adapted to the application requirements. It permits to organize the data exchange in the chosen network architecture. The originality of this protocol is that it includes efficient maintenance mechanisms that allow managing mobility and network reconfiguration (addition of a sensor, removing a sensor). In this way an adaptation and a parameterization of the IEEE 802.15.4 Standard are proposed.

The final part of this work presents the performance evaluation and analysis of the proposed MAC protocol in use cases. We studied the impact of packets size and dissemination interval parameters on energy and delay. The protocol is validated by an analytical model. We proposed a reel evaluation by prototyping. A comparison of results obtained from the different approaches is finally presented.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| | |
| 1 Les réseaux de capteurs sans fil dans l'habitat : problématique et état de l'art..... | 4 |
| 1.1 Introduction | 6 |
| 1.2 Description de l'application de surveillance de personnes..... | 6 |
| 1.2.1 Caractéristiques de l'application..... | 6 |
| 1.2.2 Exigences de l'application | 8 |
| 1.3 Architecture et facteurs de conception du réseau de capteurs | 8 |
| 1.3.1 Architecture d'un réseau de capteurs..... | 8 |
| 1.3.2 Facteurs principaux de conception | 11 |
| 1.3.3 Sources de consommation d'énergie | 12 |
| 1.3.4 Impact des technologies sans fil | 13 |
| 1.4 Projets et travaux de recherche..... | 19 |
| 1.4.1 Techniques et solutions existantes..... | 19 |
| 1.4.2 Défis de recherche actuels | 26 |
| 1.5 Méthodologie de conception | 27 |
| 1.6 Conclusion..... | 29 |
| | |
| 2 Conception d'un réseau de capteurs hétérogène pour une application de domotique | 30 |
| 2.1 Introduction | 32 |
| 2.2 Architecture et scénarios retenus..... | 32 |
| 2.2.1 Architecture multi-niveaux..... | 32 |
| 2.2.2 Scénario retenu et cahier des charges | 34 |
| 2.3 Proposition d'un modèle multi-niveaux | 36 |
| 2.3.1 Description du modèle..... | 36 |
| 2.3.2 Autres configurations possibles..... | 38 |
| 2.4 Conception d'un réseau hétérogène..... | 38 |
| 2.4.1 Comportement des nœuds capteurs | 39 |
| 2.4.1.1 Nœud Médical | 40 |
| 2.4.1.2 Nœud Coordinateur | 41 |
| 2.4.1.3 Nœud Balise | 41 |
| 2.4.1.4 Nœud Superviseur | 42 |
| 2.4.2 Organisation des échanges inter-nœuds..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5. Evaluation et analyse de performances | 43 |
| 2.5.1 Evaluation par la simulation | 43 |
| 2.5.2 Analyse des résultats et discussion | 46 |
| 2.6 Problèmes rencontrés et améliorations proposées | 50 |
| 2.7 Conclusion..... | 51 |
| 3 Vers un protocole d'accès au médium efficace en énergie | 52 |
| 3.1 Introduction | 54 |
| 3.2 Fonctionnalités et améliorations attendues..... | 54 |
| 3.3 Relaxation des hypothèses..... | 55 |
| 3.4 Protocole proposé..... | 57 |
| 3.4.1 Mécanismes de base pour l'organisation des échanges..... | 57 |
| 3.4.1.1 Les phases principales du protocole | 57 |
| 3.4.1.2 Méthode d'accès adéquate pour chaque niveau de l'architecture | 60 |
| 3.4.2 Phase de création de topologie | 61 |
| 3.4.3 Phase de collecte et de reconfiguration..... | 65 |
| 3.5 Mécanismes de maintenance et de reconfiguration associés..... | 71 |
| 3.5.1 Principe de base | 71 |
| 3.5.2 Gestion de la mobilité..... | 72 |
| 3.5.3 Cohabitation de WBANs différents..... | 73 |
| 3.5.4 Reconfiguration de la topologie..... | 74 |
| 3.6 Adaptation et paramétrage du Standard IEEE 802.15.4..... | 76 |
| 3.7 Conclusion..... | 77 |
| 4 Evaluation de performances du protocole et dimensionnement..... | 79 |
| 4.1 Introduction | 81 |
| 4.2 Validation par modèle analytique..... | 82 |
| 4.2.1 Etude de la phase d'initialisation | 82 |
| 4.2.2 Etude de la phase de collecte de données | 85 |
| 4.2.3 Analyse des résultats et discussion | 88 |
| 4.3 Validation par prototypage réel..... | 95 |
| 4.3.1 Plateforme et environnement de développement..... | 95 |
| 4.3.2 Implémentation et étude du protocole | 98 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.2.1 Paramétrage des trames | 99 |
| 4.3.2.2 Implémentation du réseau unitaire de base | 99 |
| 4.3.2.3 Implémentation du WBAN communicant..... | 101 |
| 4.3.2.4 Implémentation de l'agrégation au niveau de la Balise..... | 102 |
| 4.3.3 Analyse des résultats et discussion | 103 |
| 4.4 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes | 108 |
| 4.5 Conclusion..... | 110 |
| Conclusions et Perspectives | 113 |
| Bibliographie..... | 119 |