

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saâd DAHLAB de Blida



Faculté des sciences

Département d'informatique

Mémoire présenté par :

M^{lles} MEKAHLIA Fatma Zohra et MERABTINE Nassima

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Domaine : Mathématique et Informatique

Filière : Informatique

Spécialité : Ingénierie des Logiciels

Sujet :

*Synchronisation du Temps dans
les Réseaux de Capteurs Sans Fil*

Soutenu le : 19 Septembre 2012, devant le jury composé de :

Dr BENNOUAR Djamal, Maître de Conférences A, USDB	Président
M ^r CHERIF ZAHAR Amine, Maître Assistant A, USDB	Examineur
M ^{lle} MILOUD Amal, Maître Assistante B, USDB	Examinatrice
Dr DJENOURI Djamel, Maître de Recherche A, CERIST	Promoteur

Organisme d'accueil :

**CERIST – Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et
Technique – Ben Aknoun**

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à rendre grâce à DIEU tout puissant pour nous avoir donné le courage et la détermination nécessaire pour finaliser ce travail.

Nous tenons à remercier avec gratitude notre encadreur Docteur Djamel DJENOURI qui a endossé son rôle de la meilleure façon qui soit. Nous retiendrons sa disponibilité, son aide indéfectible, ses conseils avisés et ses idées riches ainsi que sa sympathie et ses encouragements. Nous voulons le remercier aussi de nous avoir fait bénéficier de son savoir et de son expérience tout au long de la période de notre stage, et également pour la mise à disposition de la documentation pertinente et le matériel nécessaire.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à Monsieur Samir DOUDOU pour son aide très précieuse et pour le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.

Nos remerciements vont également à tous les chercheurs du laboratoire 'réseaux de capteurs' au sein du CERIST notamment Mr Nour Eddine LASLA, et Abdelraouf OUDJAOUT, pour leurs accueil et leurs renforts.

Nous tenons à remercier Mr BENNOUAR pour l'honneur qu'il nous a fait de présider notre jury de soutenance, ainsi que Mr CHERIF ZAHAR et Mlle MILOUD pour avoir bien voulu accepter d'examiner et de juger notre modeste travail.

Par ailleurs ; nous rendons un vibrant hommage à l'ensemble du corps professoral du département d'informatique de l'université Saâd DAHLAB de Blida qui ont contribué activement à notre formation pendant notre cursus universitaire.

Nous tenons à remercier chaleureusement et affectueusement tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Nous ne pouvons pas terminer sans remercier encore une fois nos parents respectifs qui, par leur amour et leur soutien nous ont permis de mener à terme ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents en témoignage de ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour leurs sacrifices, la confiance qu'ils m'accordent, leurs soutien permanent et tout l'amour dont ils m'entourent.

A mes très chers grands parents que dieu les garde en santé.

A mes très chers frères et sœur, Tahar, Abdelhakim et Assia ainsi qu'à son époux Mohamed.

A mon adorable neveu Anes que dieu le protège.

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines.

A Meriem, Latifa, Khadidja, Amina Malki et Amina Toubelsghir, ainsi que tous mes amis que je ne peux pas, malheureusement, les citer tous.

A mon binôme Fatma Zohra ainsi que toute sa famille.

A tous mes collègues de la promotion 2011/2012, ainsi que mes collègues dans le projet au sein du CERIST.

Nassima

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail

A la femme qui a donné de son mieux pour moi et qui a longtemps attendu ce jour: ma chère maman que DIEU la protège et lui procure la santé et le bonheur.

A l'homme qui a durement travaillé pour que je puisse réaliser l'un de mes rêves et de ses rêves: mon cher papa que DIEU le protège et lui procure la santé et le bonheur.

A mes très chers frères et sœurs, ma très chère belle-sœur et à mes adorables neveux Alàa et Adam auxquels je souhaite une vie pleine de bonheur, réussite et prospérité.

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines.

Aussi à mes amis Khadidja, Melyara, Imene, Nawel, Hafsa, Amira, Latifa, Amina, Messaouda, Karima, Cherifa, Fatma Zohra et Zineb, sans oublier mes amis de section Yassine, Anouar, Lotfi, Mohamed, Ismail et Allaa Eddine.

A mes collègues de projet au sein du CERIST Aghiles et son binome Adlane, Billel et Hakim sans oublier Nassima, mon acolyte dans ce travail ainsi que toute sa famille.

A toute personne qui m'a aidé un jour à parvenir jusqu'ici, en espérant être toujours à la hauteur de leurs attentes et de leurs espérances.

Que la paix d'ALLAH soit avec tous et que DIEU nous réunisse dans son vaste paradis inchaALLAH.

Fatma Zohra

ملخص

الطبيعة التعاونية لشبكات الحساسات اللاسلكية تجعل الحاجة إلى وجود مفهوم مشترك للوقت في الشبكة شرطاً أساسياً لمعظم التطبيقات. هذا المفهوم يمكن تجسيده بتوظيف بروتوكول التزامن الزمني الذي يأخذ بعين الاعتبار مختلف القيود مثل: الطاقة المحدودة، مساحة الذاكرة المحدودة و عطل أجهزة الحساسات اللاسلكية.

في إطار مشروع البحث الوطني المعنون بـ "تسيير حركة المرور ديناميكياً باستعمال الحساسات". يكمن مشروعنا في تزامن الوقت. من أجل هذا، قمنا بدراسة مجموعة من بروتوكولات مزامنة الوقت الموجهة لشبكة الحساسات اللاسلكية، ثم قمنا بتطوير، تنفيذ و تجريب نموذج يأخذ بعين الاعتبار عطل هذه الأجهزة على مجموعة من العقد. فقد بينت النتائج المتحصل عليها أن تنفيذنا يعطي دقة عالية، في حدود الميكرو ثانية، كما بينت هذه النتائج درجة عالية من الاستقرار فيما يخص النموذج الثاني.

الكلمات الرئيسية

الحساسات الصغيرة، شبكات الحساسات اللاسلكية، بروتوكول تزامن الوقت، إنحراف الساعة، طرق التقدير.

Résumé

La nature coopérative des réseaux de capteurs sans fil (WSN) rend le besoin d'une notion du temps commune dans le réseau une exigence primordiale pour la majorité des applications. Ceci peut être assuré par un protocole de synchronisation du temps, qui doit prendre en considération diverses contraintes telles que l'énergie limitée, l'espace mémoire réduit et les pannes des micro-capteurs.

Dans le cadre d'un projet de recherche national «la gestion dynamique du trafic routier en utilisant les réseaux de capteurs sans fil», notre projet consiste à assurer la synchronisation du temps des micro-capteurs. Pour ce faire, nous avons étudié un ensemble de protocoles de synchronisation du temps destinés aux WSNs, puis nous avons développé, implémenté et testé une variante tolérante aux fautes du protocole R^4_{syn} dans des micro-capteurs réels de type MICAz. Les résultats montrent que notre implémentation offre une très bonne précision, à l'ordre de quelques microsecondes, et une grande stabilité pour le modèle *skew/offset*.

Mots clés

Micro-capteur, Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de synchronisation du temps, Déviation des horloges, Méthodes d'estimation, TinyOS, NesC.

Abstract

The cooperative nature of wireless sensor networks (WSN) makes the need for a common time reference in the network a key requirement for most applications. This can be assured by a time synchronization protocol, which must take into account various constraints such as the limitation in energy supply, memory, and the node failure.

As part of a national research project, "road traffic management using wireless sensor networks", our task has been focusing on providing time synchronization to sensor motes in WSN. First, a set of WSN time synchronization protocols have been studied, then a fault-tolerant variant of the R4syn has been developed, implemented and tested in MICAz sensor motes. The results are encouraging and demonstrates high accuracy of the implemented protocol (in the order of few microseconds), and show more stability for the join *skew/offset* model, i.e. the model that takes the *drift* phenomenon into account.

Keywords

Sensor mote, Wireless Sensor Network, Time Synchronization Protocol, Clock Drift, estimation methods, TinyOS, NesC.

Liste des Acronymes

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CENS	<i>Center for Embedded Networking Sensing</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
Eq	<i>Equation</i>
ETSM	<i>Efficient Time Synchronization Mechanism for Wireless Multi Hop Networks</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FTSP	<i>Flooding Time Synchronization Protocol</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
ID	<i>Identifiant</i>
IEEE	<i>Institute of Electronic and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIB	<i>Mote Interface Board</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimators</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
PFM	<i>Program Flash Memory</i>
PNR	<i>Projet National de Recherche</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RBS	<i>Reference Broadcast Synchronization</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>

Liste des Acronymes

<i>R⁴Syn</i>	<i>Relative Referenceless Receiver/Receiver time Synchronization in wireless sensor networks</i>
<i>TinyOS</i>	<i>Tiny Operating System</i>
<i>TPSN</i>	<i>Timing-sync Protocol for Sensor Networks</i>
<i>UCLA</i>	<i>University of California Los Angeles</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>UTC</i>	<i>Universal Time Coordinated</i>
<i>VHT</i>	<i>Virtual High-resolution Time</i>
<i>WSN</i>	<i>Wireless Sensor Network</i>

Liste des Figures

- p. 08 - Figure 1.1 : Architecture d'un micro-capteur (capteur intelligent).*
- p. 09 - Figure 1.2 : Schéma d'un réseau de capteurs sans fil.*
- p. 10 - Figure 1.3 : Pile protocolaire des micro-capteurs [ASC02].*
- p. 22 - Figure 2.1 : Sources d'erreur communes dans les méthodes de synchronisation.*
- p. 23 - Figure 2.2 : Synchronisation Maître/esclave versus pair-to-pair.*
- p. 26 - Figure 2.3 : Topologie hiérarchique des nœuds.*
- p. 27 - Figure 2.4 : Echange de deux messages entre les deux nœuds A et B.*
- p. 31 - Figure 2.5 : Schéma d'un réseau multi-sauts.*
- p. 32 - Figure 2.6 : Diffusion des messages de synchronisation dans un seul cycle [Dje11].*
- p. 39 - Figure 3.1 : Sources d'erreurs dans les deux approches de synchronisation [EGE02].*
- p. 51 - Figure 4.1: Architecture de MICAz [W01].*
- p. 51 - Figure 4.2: Micro-capteur 'MICAz'*
- p. 52 - Figure 4.3: Programming Board MIB520.*
- p. 52 - Figure 4.4: Data Acquisition Board MDA300CA.*
- p. 53- Figure 4.5: Arduino UNO.*
- p. 56 - Figure 4.6: Architecture de notre implémentation.*
- p. 61 - Figure 4.7: Précision du protocole dans la première expérience.*
- p. 62 - Figure 4.8: Deuxième méthode.*
- p. 63 - Figure 4.9: Pins de la carte d'extension.*
- p. 64 - Figure 4.10: Précision du protocole dans la deuxième expérience.*
- p. 65 - Figure 4.11: Troisième méthode.*
- p. 65 - Figure 4.12: Précision du protocole dans la troisième expérience.*

- p. 66 – Figure 4.13 : Stabilité du modèle offset-only.*
- p. 67 - Figure 4.14 : Précision du modèle Skew/Offset.*
- p. 67 - Figure 4.15 : Moyenne de la précision du modèle skew/offset.*
- p. 68 - Figure 4.16 : Stabilité du modèle skew/Offset.*
- p. 69 - Figure 4.17 : Comparaison de stabilité entre les deux modèles.*
- p. 70 - Figure 4.18 : Continuité de la synchronisation.*
- p. 71 - Figure 4.19 : Granularité de la synchronisation.*
- p. 71 - Figure 4.20 : Interface de l'outil serial Forwarder.*
- p. 72 - Figure 4.21: Aperçu de l'application Oscilloscope.*

Liste des Tableaux

- p. 06 - Tableau 1.1 : Différentes plateformes des micro-capteurs.*
- p. 60 – Tableau 4.1 : Paramètres du protocole.*
- p. 69 - Tableau 4.2 : Paramètres de mécanismes de tolérance aux fautes.*

Table des Matières

Introduction Générale

1.	<i>Contexte du Travail</i>	1
2.	<i>Cadre du Projet</i>	2
3.	<i>Problématique et Motivations</i>	2
4.	<i>Objectif du Travail</i>	3
5.	<i>Organisation du Mémoire</i>	3

Partie I: Etat de l'Art

Chapitre I : Généralités sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil

1.	<i>Introduction</i>	6
2.	<i>Micro-capteur « Mote »</i>	6
2.1.	<i>Présentation d'un Micro-capteur</i>	6
2.2.	<i>Architecture Physique d'un Micro-capteur « Hardware »</i>	7
2.3.	<i>Caractéristiques Physiques d'un Micro-capteur</i>	8
2.3.1.	<i>Autonomie et Adaptabilité</i>	8
2.3.2.	<i>Ressources Energétiques et Matérielles Limitées</i>	8
2.3.3.	<i>Taux de Transfert Limité</i>	9
3.	<i>Réseaux de Capteurs Sans Fil</i>	9
3.1.	<i>Architecture d'un WSN</i>	9
3.2.	<i>Pile Protocolaire d'un Micro-capteur</i>	9

3.3.	<i>Facteurs et Contraintes de Conception d'un WSN</i>	10
3.3.1.	<i>Auto-Configuration</i>	11
3.3.2.	<i>Facteur d'Echelle « Scalability »</i>	11
3.3.3.	<i>Absence d'Infrastructure</i>	11
3.3.4.	<i>Contrainte d'Energie</i>	11
3.3.5.	<i>Ressources Matérielles Limitées</i>	12
3.3.6.	<i>Topologie Dynamique</i>	12
3.3.7.	<i>Agrégation de Données</i>	12
3.3.8.	<i>Tolérance aux Pannes</i>	12
3.4.	<i>Types des Flux de Données dans un WSN</i>	13
3.4.1.	<i>Périodique</i>	13
3.4.2.	<i>Événementiel</i>	13
3.4.3.	<i>Requête/Réponses</i>	13
3.4.4.	<i>Hybride</i>	13
4.	<i>Domaines d'Application des Réseaux de Capteurs Sans Fil</i>	13
4.1.	<i>Applications Environnementales</i>	14
4.2.	<i>Applications Militaires</i>	14
4.3.	<i>Applications Médicales</i>	14
4.4.	<i>Applications de Gestion du Trafic Routier</i>	14
4.5.	<i>Applications Commerciales</i>	15
4.6.	<i>Applications Domestiques</i>	15
4.7.	<i>Application à la Sécurité</i>	15

5.	<i>Conclusion</i>	16
----	-------------------------	----

Chapitre II : La Synchronisation Temporelle dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

1.	<i>Introduction</i>	18
2.	<i>Besoin de Synchronisation du Temps dans les WSNs</i>	18
3.	<i>Concepts de Base</i>	19
3.1.	<i>Modèle d'Horloge</i>	19
3.2.	<i>Exigences de la Synchronisation du Temps dans les WSNs</i>	20
3.3.	<i>Sources d'Erreurs</i>	21
3.3.1.	<i>Temps d'Envoi « Send Time »</i>	21
3.3.2.	<i>Temps d'Accès « Access Time »</i>	21
3.3.3.	<i>Temps de Propagation « Propagation Time »</i>	22
3.3.4.	<i>Temps de Réception « Receive Time »</i>	22
3.4.	<i>Classification des Protocoles de Synchronisation du Temps</i>	22
3.4.1.	<i>Maitre/Esclave versus Peer-to-Peer</i>	22
3.4.2.	<i>Sender / Receiver versus Receiver / Receiver</i>	23
3.4.3.	<i>Synchronisation Relative versus Synchronisation Absolue</i>	23
3.4.4.	<i>Synchronisation Locale versus Synchronisation Globale</i>	23
3.4.5.	<i>Correction d'Horloge versus Horloge Relative</i>	24
3.4.6.	<i>Synchronisation Centralisée versus Synchronisation Décentralisée</i>	24
4.	<i>Protocoles de Synchronisation du Temps dans les WSNs</i>	24

4.1.	<i>Timing-sync Protocol for Sensor Networks « TPSN »</i>	24
4.1.1.	<i>Description</i>	24
4.1.2.	<i>Principe</i>	25
4.1.3.	<i>Phase de Découverte de Niveau « Level Discovery Phase »</i>	25
4.1.4.	<i>Phase de Synchronisation « Synchronization Phase »</i>	26
4.1.5.	<i>Estimation des Paramètres de Synchronisation</i>	27
4.2.	<i>Flooding Time Synchronization Protocol « FTSP »</i>	28
4.3.	<i>Reference Broadcast Synchronization « RBS »</i>	28
4.3.1.	<i>Description</i>	28
4.3.2.	<i>Principe</i>	29
4.3.3.	<i>Estimation des Paramètres de Synchronisation</i>	29
4.3.4.	<i>Synchronisation Globale</i>	30
4.4.	<i>Relative Referencless Receiver/Receiver Time Synchronisation in Wireless Sensor Networks « R⁴Syn»</i>	31
4.4.1.	<i>Description</i>	31
4.4.2.	<i>Principe</i>	31
4.4.3.	<i>Estimation des Paramètres de Synchronisation</i>	32
4.4.4.	<i>Synchronisation Globale</i>	33
4.5.	<i>Efficient Time Synchronization Mechanism for Wireless Multi Hop Networks« ETSM »</i>	34
4.5.1.	<i>Sélection des Nœuds Emetteurs</i>	34
4.5.2.	<i>Synchronisation des Nœuds</i>	34
4.5.3.	<i>Estimation des Paramètres de Synchronisation</i>	35

4.5.4.	<i>Synchronisation Globale</i>	35
5.	<i>Conclusion</i>	36

Partie II: Conception, Implémentation et Tests

Chapitre III : Protocole Développé

1.	<i>Introduction</i>	38
2.	<i>Caractéristiques du Protocole R4syn</i>	38
2.1.	<i>Complexité de Communication</i>	38
2.1.1.	<i>Définition</i>	38
2.1.2.	<i>Complexité du Protocole R4syn</i>	38
2.2.	<i>Approche Suivie</i>	39
2.3.	<i>Type de la Référence</i>	40
3.	<i>Tolérance aux Fautes</i>	40
4.	<i>Conception</i>	40
4.1.	<i>Communication</i>	41
4.1.1.	<i>Description</i>	41
4.1.2.	<i>Algorithme</i>	42
4.2.	<i>Estimation</i>	43
4.2.1.	<i>Description</i>	43
4.2.2.	<i>Algorithme</i>	44
4.3.	<i>Mécanisme de Tolérance aux Fautes</i>	44
4.3.1.	<i>Déclenchement de la Synchronisation</i>	44

4.3.1.1.	<i>Description</i>	44
4.3.1.2.	<i>Algorithme</i>	45
4.3.2.	<i>Continuité de la Synchronisation</i>	45
4.3.2.1.	<i>Description</i>	45
4.3.2.2.	<i>Algorithme</i>	46
4.3.3.	<i>Granularité de la Synchronisation</i>	47
4.3.3.1.	<i>Description</i>	47
4.3.3.2.	<i>Algorithme</i>	48
4.4.	<i>Conversion</i>	48
5.	<i>Conclusion</i>	49

Chapitre IV : Implémentation et Tests Réels

1.	<i>Introduction</i>	51
2.	<i>Plateforme d'Implémentation</i>	51
2.1.	<i>Plateforme Matérielle</i>	51
2.1.1.	<i>Micro-capteur</i>	51
2.1.2.	<i>Programmateur « Programming Board »</i>	51
2.1.3.	<i>Carte d'Extension «Data Acquisition Board »</i>	52
2.1.4.	<i>Arduino UNO</i>	52
2.2.	<i>Plateforme Logicielle</i>	53
2.2.1.	<i>Système d'Exploitation TinyOS</i>	53
2.2.2.	<i>Langage de Programmation NesC</i>	54

2.2.3.	<i>Simulateur Aurora</i>	54
3.	<i>Réalisation de R⁴ Syn</i>	54
3.1.	<i>Horloge Utilisée</i>	54
3.1.1.	<i>Horloge de Microcontrôleur</i>	55
3.1.2.	<i>Horloge Externe</i>	55
3.2.	<i>Implémentation</i>	55
3.2.1.	<i>Offset-only</i>	56
3.2.1.1.	<i>TimeSyncP</i>	56
3.2.1.2.	<i>TimeSyncTreatmentOffsetOnlyP</i>	57
3.2.1.3.	<i>TimeSyncEstimOffsetOnlyP</i>	57
3.2.1.4.	<i>CC2420ReceiveP</i>	57
3.2.2.	<i>Skew/Offset</i>	58
4.	<i>Tests Réels de R4 Syn</i>	59
4.1.	<i>Paramètres du Protocole</i>	59
4.2.	<i>Offset-Only</i>	60
4.2.1.	<i>Précision</i>	60
4.2.1.1.	<i>Première Méthode</i>	61
4.2.1.2.	<i>Deuxième Méthode</i>	62
4.2.1.3.	<i>Troisième Méthode</i>	64
4.2.2.	<i>Stabilité</i>	66
4.3.	<i>Skew/Offset</i>	66
4.3.1.	<i>Précision</i>	66

4.3.2.	<i>Stabilité</i>	68
4.4.	<i>Comparaison Entre les deux Modèles</i>	68
4.5.	<i>Tolérance aux Fautes</i>	69
4.5.1.	<i>Continuité</i>	69
4.5.2.	<i>Granularité</i>	70
5.	<i>Application Oscilloscope</i>	71
6.	<i>Conclusion</i>	72
	 <i>Conclusion Générale et Perspectives</i>	 75

Annexes

Annexe A : Système d'Exploitation TinyOS

Annexe B : Langage de Programmation NesC

Annexe C : Simulateur Avrora

Annexe D : Procédures d'Installation

Références Bibliographiques et Webographiques