

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique
Ecole Doctorale d'Informatique

Mémoire de Magistère en Informatique

Option : Réseaux et Systèmes Distribués



Thème

Synchronisation d'Horloges dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil

Présenté par
Aissaoua Habib

Devant le jury :

Président : Aïssani Djamil, Professeur, Université de Béjaia.

Rapporteur : Boukerram Abd Allah, MC, Université de Sétif.

Examineur : Abdelouaheb Moussaoui, MC, Université de Sétif.

Examineur : Ali Melit, MC, Université de Jijel.

Invité : Aliouat Makhlouf, Docteur, Université de Sétif.

Promotion 2006 / 2007

Dédicaces

À ma mère

À mon père

À mes frères et sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis

Aissaoua Habib

Remerciements

Je remercie Dieu le tout Puissant qui m'a donné la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur Boukerram Abd Allah, maître de conférence à l'université de Sétif (UFA, Sétif), d'avoir accepté d'être mon encadreur durant cette année de magistère, et pour la confiance qu'il m'a donnée et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Aliouat Makhlouf, docteur à l'université Farhet Abbas (UFA, Sétif), pour les longues discussions, les conseils judicieux ainsi que les heures passées sur ce document.

Je remercie tous nos enseignants de l'école doctorale ReSyD. Merci pour Monsieur A. Tari, chef de département d'informatique de l'université de Béjaia, pour tout ce qu'il a fait pour l'école doctorale.

Mes remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie tous les étudiants de l'école doctorale ReSyD, pour l'environnement de travail très agréable durant ces deux années de magistère.

Je remercie tous les personnes qui m'ont aidé durant la préparation de ce mémoire de près ou de loin.

Je conclurai, en remerciant vivement toute ma famille qui m'a toujours supporté moralement et financièrement pendant toutes mes longues années d'étude.

Résumé. L'avènement des réseaux de capteurs sans-fil (RCSFs) a suscité durant cette dernière décennie un rush vers des déploiements tout azimut. Nombreux sont les domaines d'application qui s'ouvrent largement aux RCSFs, de l'ultra stratégique au simple confort de l'habitat intelligent. Compte tenu des activités frénétiques de recherche qui s'y développent, l'essor prometteur des RCSFs semblerait aller indubitablement en crescendo dans les années à venir. Toutefois, pour l'heure actuelle, certaines entraves empêchent ces déploiements d'atteindre une pleine satisfaction. Pour assainir ces entraves, beaucoup d'axes de recherche dans les RCSFs y sont concernés. C'est ainsi que la synchronisation d'horloges constitue un des domaines cruciaux où la gestion adéquate du temps physique est à promouvoir. En effet, constituant un service fondamental dans beaucoup d'applications sans-fil, la synchronisation d'horloges doit répondre de manière propice aux exigences des RCSFs. Bien que ce problème de synchronisation ait été bien étudié dans les réseaux filaires traditionnels, les contraintes physiques des composants sans-fil imposent un ensemble unique de défis à relever. La conservation de l'énergie en est un et de première importance. Le but du travail rapporté dans ce mémoire est d'étudier la synchronisation d'horloges dans les RCSFs afin de présenter un état de l'art sur la question, d'identifier les faiblesses des protocoles de synchronisation d'horloges actuels et d'apporter une contribution via une proposition d'un algorithme visant à réduire le calcul et l'énergie de communication dépensée.

Abstract. The advent of the wireless sensor networks (WSNs) has raised over the past decade a rush to all-out deployments. Many application areas are widely opening to the WSNs, from the ultra strategic to the simple comfort of intelligent habitat. Given the frenetic activities of research that are emerging, the promising development of WSNs seems to go undoubtedly crescendo in the years to come. However, for the moment, some barriers are preventing these deployments from achieving full satisfaction. To overcome these barriers, many areas of research in WSNs are concerned. Thus, clock synchronization is one of the crucial areas where the proper management of the physical time is to be promoted. Indeed, as a fundamental service in many wireless applications, clock synchronization must respond in an appropriate manner to the requirements of the WSNs. Although this synchronization issue has been well studied in traditional wired networks, the physical limitations of wireless components impose a set of unique challenges. Energy conservation is a challenge of first importance. The objective of this work is to study the clocks synchronization in WSNs in order to present a state of the art on the issue, to identify the weaknesses of the proposed protocols, and to provide a contribution via a proposal of an algorithm to reduce the computation and communication energy spent.

Mots clés : Communication sans-fil, Réseaux de capteurs sans-fil, Synchronisation d'horloges.

Keywords: Wireless communication, Wireless sensor networks, Clock synchronization.

Table des matières

Chapitre 1.

Les réseaux de capteurs sans-fil

1. Introduction.....	8
2. Les réseaux sans-fil	8
2.1 Classification des réseaux sans-fil	8
3. Les réseaux mobiles Ad Hoc	9
3.1 Fonctionnement.....	9
3.2 Caractéristiques des réseaux Ad Hoc	10
4. Les réseaux de capteurs sans-fil (Wireless Sensor Networks)	11
5. Les RCSFs vs ad hoc.....	12
6. Les nœuds d'un RCSFs	13
6.1 Processeur embarqué à faible puissance.....	13
6.2 Mémoire de stockage	14
6.3 Emetteur/récepteur (Transceiver) radio.....	14
6.4 Senseur (sensor)	14
6.5 Système de géo positionnement.....	14
6.6 Source d'énergie	14
7. Architecture de communication d'un RCSFs	15
8. Les protocoles de communications	16
8.1 Couche application.....	16
8.2 Couche transport	17
8.3 Couche réseau	17
8.3.1 Routage dans les RCSFs.....	17
8.4 Couche liaison de données	18
8.4.1 Contrôle d'accès au support	19
8.5 Couche physique	19
9. Les applications des RCSFs.....	20
9.1 Les applications militaires	20
9.2 Les applications environnementales	20
9.3 Les applications médicales	20
9.4 Les applications industrielles.....	21
9.5 Les applications domestiques et de la vie civile	21
10. Classification des RCSFs.....	21
10.1 Les RCSFs mobiles	21
10.2 Les RCSFs fixes.....	21
11. Les RCSFs standards.....	22
12. Caractéristiques des RCSFs.....	22
12.1 Contraintes de ressources et de l'énergie	22
12.2 Topologie dynamique.....	23

12.3	Taille et densité de réseau.....	23
12.4	Agrégation des données.....	23
13.	Systèmes d'exploitation.....	24
13.1	TinyOS	24
14.	Topologie des RCSFs.....	24
14.1	Topologie en étoile.....	24
14.2	Topologie maillé et en grille.....	25
14.3	Topologie hiérarchique de clusters	25
15.	Domaine de recherche dans les RCSFS	27
15.1	Déploiement.....	27
15.2	Synchronisation d'horloges	27
15.3	Sécurité.....	27
15.4	Localisation.....	28
15.5	Agrégation des données.....	29
16.	Conclusion	29
Chapitre 2.		
Synchronisation d'horloges dans les réseaux traditionnels		
1.	Introduction.....	30
2.	Difficulté de la synchronisation d'horloge	31
3.	Méthodes de synchronisation d'horloge.....	31
3.1	Méthodes symétriques.....	32
3.2	Méthodes asymétriques	32
4.	Synchronisation externe et synchronisation interne.....	33
4.1	Synchronisation externe	33
4.2	La synchronisation interne.....	33
5.	Définitions de base	34
5.1	Temps et Fréquence	34
5.2	Stabilité.....	34
5.3	L'exactitude (accuracy).....	34
5.4	Précision	35
5.5	Synchronisation.....	35
6.	Facteurs influençant la synchronisation d'horloges	35
7.	Terminologie d'horloge	36
8.	Synchronisation avec GPS.....	37
9.	Temps virtuel (Virtual Time).....	38
10.	Quelques algorithmes traditionnels de synchronisation d'horloges.....	38
10.1	Algorithme de Cristian	38
10.2	Algorithme de Berkeley	39
10.3	Algorithme d'Arvind.....	40
10.4	Network Time Protocol(NTP)	41
10.4.1	Le décalage d'horloge et l'estimation de délai	41

10.4.2 Les modes d'opération du protocole NTP	42
11. Tolérance aux fautes.....	43
12. Conclusion	45
Chapitre 3.	
Synchronisation d'horloges dans les RCSFs	
1. Introduction.....	46
2. Synchronisation traditionnelle versus RCSFs.....	46
2.1 La contrainte d'énergie.....	46
2.2 Précision accordable (Tunable Accuracy).....	47
2.3 Non-déterminisme.....	47
2.4 Multi-sauts	47
2.5 Infrastructure.....	47
3. Limitations du NTP	48
3.1 Énergie et ressource	48
3.2 Réseau dynamique	48
3.3 Infrastructure.....	49
3.4 Configuration	49
4. Exigences sur les méthodes de synchronisation pour les RCSFs	49
4.1 L'énergie.....	49
4.2 L'échelle (Scalability)	50
4.3 Précision	50
4.4 Robustesse	50
4.5 Durée de vie (lifetime)	50
4.6 Portée (scope)	50
4.7 Coût et taille.....	50
4.8 Immédiateté (Immediacy).....	51
5. Domain d'application de la synchronisation	51
6. Utilisations de la synchronisation dans les systèmes distribués	52
7. Les sources d'erreur de synchronisation des horloges.....	53
7.1 Le temps d'envoi.....	53
7.2 Le temps d'accès.....	54
7.3 Le temps de transmission	54
7.4 Le temps de propagation	54
7.5 Le temps de réception.....	54
7.6 Le temps de recevoir	54
8. Conclusion	55
Chapitre 4.	
Etat de l'art de la synchronisation dans les RCSFs	
1. Introduction.....	56
2. Post-facto synchronisation [71]	56
3. Transformation du temps [72]	57
4. Synchronisation avec diffusion de référence	60

4.1	RBS avec Post-facto synchronisation	62
4.2	RBS en multi sauts	62
5.	TPSN [74]	63
6.	Synchronisation d'horloge adaptative	65
7.	LTS [76]	68
7.1	LTS Multi-saut centralisé	68
7.2	LTS Multi-saut distribué	69
8.	FTSP [77]	70
9.	Synchronisation d'horloge globale dans les réseaux de capteurs	72
9.1	Algorithme de diffusion synchrone	73
9.2	Algorithme de diffusion asynchrone	74
10.	Tiny-Sync et Mini-Sync	75
10.1	Tiny-sync	77
10.2	Mini-sync	77
11.	Synchronisation d'horloges continues dans les applications temps réel sans-fil	79
12.	Classification des protocoles de synchronisation dans les RCSFs	81
12.1	Synchronisation interne versus synchronisation externe	82
12.1.1	Synchronisation interne	82
12.1.2	Synchronisation externe	82
12.2	Synchronisation émetteur-à-récepteur versus récepteur-à-récepteur	82
12.2.1	Synchronisation émetteur-à-récepteur	82
12.3	Synchronisation récepteur-à-récepteur	83
12.4	Durée de vie : continu versus à la demande	83
12.4.1	Event-triggered	84
12.4.2	time-triggered	84
12.5	Portée : tous les nœuds versus sous-ensembles	84
12.6	Synchronisation probabiliste versus déterministe	84
12.6.1	Synchronisation probabiliste	84
12.6.2	Synchronisation déterministe	85
12.7	Réseaux avec un seul saut versus multi-saut	85
12.7.1	Communication avec un seul saut	85
12.7.2	Communication multi-saut	85
12.8	Réseaux fixes versus réseaux mobiles	85
12.8.1	Réseaux fixes	86
12.8.2	Réseaux mobiles	86
12.9	Transformation de temps versus synchronisation d'horloge	86
12.10	Instants de temps versus intervalles de temps	86
13.	Les stratégies d'évaluation	87
13.1	Précision	87
13.1.1	La combinaison d'erreur de synchronisation de plusieurs nœuds	87

13.1.2	État Stable et Temps de Convergence	88
13.2	Energie.....	88
13.3	L'échelle (Scalability)	89
13.4	Tolérance aux fautes.....	89
13.5	Complexité.....	89
13.6	Compatibilité avec le mode sommeil	90
14.	Conclusion	90
Chapitre 5.		
Proposition		
1.	Introduction.....	92
2.	Pourquoi une approche récepteur-à-récepteur ?	92
3.	Exemple applicative	99
4.	Extension pour un réseau Multi-sauts	100
5.	Evaluation des performances	102
5.1	Complexité en communication	102
5.2	Temps de Convergence	103
5.3	Tolérance aux fautes.....	103
6.	Simulation.....	104
7.	Conclusion	106
	Bibliographie.....	108