

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



Université A/Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique

MÉMOIRE DE MASTER RECHERCHE

En
Informatique
Option
Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Routage dans les réseaux de capteurs et
actionneurs sans fil

Présenté par : Mlle Asma BOUDRIOUA

Soutenu le .. Juin 2016 devant le jury composé de :

Président	Maître de conf. A	U. A/Mira Béjaïa.
Rapporteur Dr O. MOULOUD	Maître de conf. A	U. A/Mira Béjaïa.
Rapporteur Md S. YAHIAOUI	Doctorante	U. A/Mira Béjaïa.
Rapporteur	Maître de conf. A	U. A/Mira Béjaïa.
Examineur Dr C. ??	Maître de conf. B	U. A/Mira Béjaïa.
Examinatrice Mlle D. ??	Doctorante "LMD"	U. A/Mira Béjaïa.

Béjaia, Juin 2016.

** Remerciements **

Avant tout, le grand et le vrai merci à Allah qui m'a donné la force et la vie pour accomplir cette tâche.

Je désire exprimer mes sincères gratitudee à mes encadreurs M. OMAR Mawloud et Mme YAHIAOUI Souraya de m'avoir soutenu tout au long de la réalisation de mon mémoire. Je tient à les remercier également pour la haute qualité de leur encadrement, leur suivi, ainsi que leur conseils et leur critiques constructives.

Je suis très honorée par la présence de M. DJEBARI Nabil, qui a accepté de présider le jury de ma soutenance. Je suis également très honorée par la présence M. ATMANI Mouloud, M. ZAMOUDJ Salah et M. MIR Foudil. Je tient à les remercier d'avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.

Mes remerciements les plus chaleureux à mes parent, pour leur soutien, leurs encouragements et leurs sacrifices.

Je remercie également tous mes amis en particulier Yasmine, Massi, mes collègues et tous ceux qui ont contribué de pré ou de loin dans la réalisation de ce travail.

✧ *Dédicaces* ✧

A mes très chers parents.
A toute personne qui m'a aidé.

ASMA Boudrioua

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iii
Liste des tableau	iv
Liste des algorithmes	v
Liste des abreviations	vi
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs et actionneurs	4
1.1 Introduction	4
1.2 Les réseaux de capteurs sans fil	4
1.3 Les réseaux de capteurs et actionneurs	7
1.4 Applications des WSANs	9
1.4.1 Caractéristiques des WSANs	10
1.5 Conclusion	11
2 Taxonomie des protocoles de routage dans les RCASFs	12
2.1 Introduction	12
2.2 Classification	13
2.3 Étude de quelques protocoles de routage	14
2.3.1 Étude général	15

2.3.2	Étude critique	17
2.4	Conclusion	31
3	Nouveau protocole de routage dans les WSNs	32
3.1	Introduction	32
3.2	Motivation	33
3.3	Propriétés du réseau et hypothèses	33
3.4	Principe du protocole E ² RAT	35
3.4.1	Aperçu global	35
3.5	Description détaillée des phases de E ² RAT	36
3.5.1	Phase d'initialisation	36
3.5.2	Coordination Capteur-Actionneur	39
3.5.3	Table de croisement	41
3.5.4	Coordination Actionneur-Actionneur	42
3.6	Conclusion	46
4	Évaluation de performances	47
4.1	Introduction	47
4.2	Environnement et paramètres de simulation	47
4.3	Résultats obtenus	48
4.4	Conclusion	53
	Conclusion et perspectives	54

Table des figures

1.1	Les composants d'un capteur.	5
1.2	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.	6
1.3	(a) Architecture automatique et (b) Architecture semi-automatique.	9
2.1	Classification de la taxonomie des protocoles de routages dans WSNs [40].	14
2.2	Illustration du fonctionnement global du protocole ADA [41].	21
2.3	Le format du réseau après la deuxième phase [23].	23
2.4	Illustration du fonctionnement du réseau [38].	27
2.5	Illustration de la phase de joinure [37].	30
3.1	L'architecture du réseau.	34
3.2	Illustration de la procédure de Traking.	39
3.3	Fonctionnement globale de E ² RAT.	41
4.1	L'énergie consommée par le réseau en fonction du nombre d'événement.	49
4.2	Taux d'énergie consommée par le réseau en fonction du nombre de noeuds déployés.	50
4.3	Temps de bout en bout en fonction trafic généré.	51
4.4	Nombre de paquets perdus en fonction du nombre de noeuds déployés.	52

Liste des tableaux

4.1 Paramètres de simulation. 48

Liste des algorithmme

1 La coordination capteur-actionneur dans E²RAT 45

Liste des abreviations

- ADA** Actor-oriented **D**irectional anycast in wireless sensor and **A**ctuator networks.
- BCDCP** Base-station **C**ontrolled **D**ynamic **C**lustering **P**rotocol.
- CAN** Convertisseur **A**nalogique **N**umérique.
- DHAC** Distributed **H**ierarchical **A**gglomerative **C**lustering.
- ELCH** Extending **L**ifetime of **C**luster **H**ead.
- ESDC** Event-to-**S**ink **D**irected **C**lustering in wireless sensor networks.
- GPS** **G**lobal **P**ositioning **S**ystems.
- HERO** **H**ierarchical **E**fficient and **R**eliable routing protocol for **W**SANs.
- HPAR** **H**ierarchical **P**ower **A**ware **R**outing.
- LRP-QS** **L**ightweight **R**outing with **QoS**.
- NHRPA** **N**ovel **H**ierarchical **R**outing protocol **A**lgorithm.
- PDA** **P**ersonal **D**igital **A**ssistant.
- QoS** **Q**ualité de **S**ervice.
- RCSF** **R**éseau de **C**apteur **S**ans **F**il.
- RCASF** **R**éseau de **C**apteur **A**ctionneur **S**ans **F**il.
- VPGR** **V**irtual **P**osition based **G**eographic **R**outing for wireless sensor networks.
- WSNs** **W**ireless **S**ensor **N**etworks.
- WSANs** **W**ireless **S**ensor and **A**ctuator **N**etworks.

Introduction générale

Durant la dernière décennie, un nouveau type de réseau sans fil a suscité un grand intérêt auprès de la communauté scientifique, il s'agit des réseaux ad hoc. Particulièrement, les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil (WSANs) qui peuvent être définis comme une extension des réseaux de capteurs sans fil, où on trouve en plus des capteurs, des éléments actifs riches en ressources appelés actionneurs. Ces dispositifs sont chargés de prendre des décisions et encore capables de réagir sur la zone événement [37]. Ce type particulier de réseaux est dédiés à des applications spécifiques telles que la surveillance environnementale, le domaine médical et militaire [34]. WSANs sont capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement. En effet, ils ont été une solution efficace permettant d'étendre le champs d'application [29, 36]. Les propriétés que possède ce réseau ont contribué à son succès. Ces propriétés peuvent être résumées en trois points : la facilité de déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation. L'absence d'infrastructure, la limitation d'énergie et la topologie dynamique sont quelques contraintes majeures qui freinant leur développement. Assurer un routage avec une optimisation des délais de bout en bout et la minimisation de la consommation énergétique est une tâche difficile. Surtout que ce type particulier de réseaux ad-hoc est dédié aux applications exigeant un temps de réponse réduit et une consommation minimale d'énergie. Dans cette optique, plusieurs thématiques ont été ouvertes et différents défis ont été soulevés. Nous nous sommes focalisés à celle du routage avec qualité de service. Le routage qui a comme objectif d'assurer l'acheminement complet de l'information captée dans la zone d'événement vers un actionneur qui exécutera ensuite la tâche appropriée. Pour

ce faire, le développement de nouveaux protocoles qui répondent à ces exigences est indispensable.

Il y a eu des efforts considérables pour résoudre les problèmes liés au routage dans les WSNs. Récemment, plusieurs approches ont été décrites dans la littérature [40, 34]. En outre, des études antérieures visent à améliorer l'efficacité énergétique de l'ensemble du réseau. Les travaux de recherche dans le domaine du routage se sont, jusqu'à présent, focalisés sur l'étude de la manière dont les capteurs fonctionnent. En effet, la communauté scientifique a donné peu d'intérêt à l'étude du comportement des actionneurs, de ce fait nous avons conçu un protocole qui réalise un plus court délai de transmission en observant juste ces actionneurs.

Dans ce mémoire, nous proposons un nouveau protocole qui permet de router l'information dans les WSNs, nommé E²RAT (Efficient Estimation Routes based on Actor Tracking) qui est une solution efficace qui garantit les exigences en termes de délai de communication et d'énergie consommée. Notre protocole repose principalement d'une part, sur la méthode triangulation pour localiser l'actionneur en état stable, d'autre part, en effectuant un tracking de l'actionneur dans le cas où ce dernier est en mobilité, afin d'estimer sa position. Cette solution nous permet de déterminer l'actionneur le plus proche de la zone d'événement et pour pouvoir mener une réaction dans les deadlines souhaitées.

Organisation du manuscrit

Dans le chapitre 1, nous présenterons une description des WSNs et des WSNs : leurs architectures ainsi que leurs caractéristiques ainsi que leur des champs d'application.

Le chapitre 2 illustrera quelques protocoles qui ont été proposés dans la littérature d'une manière générale, suivi d'une analyse approfondie de certaines autres approches ainsi que de leurs protocoles sous-jacents, suivant un certain nombre de critères de performance que nous avons jugé les plus importants.

Dans le chapitre 3, nous présenterons une description détaillée de notre approche et les différentes étapes de E²RAT.

Le chapitre 4, quant à lui, sera consacré à la simulation du protocole proposé où des résultats de comparaison seront présentés.

Enfin, nous dégageront plusieurs perspectives de recherche notamment en évoquant les hypothèses de travail qui restent à reconsidérer.

Généralités sur les réseaux de capteurs et actionneurs

1.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil, Wireless Sensor Network (WSN), et son extension réseau de capteurs et actionneurs, Wireless Sensor and Actuator Network (WSAN), consistent d'un grand nombre de noeuds capteurs, distribués qui s'auto-organisent en un réseau sans fil multi-sauts. L'objectif de ces noeuds capteurs est de récolter des grandeurs physiques à partir de l'environnement où ils sont déployés, et dans les WSAN, les actionneurs sont capables d'agir sur l'environnement. Les données collectées sont traitées et envoyées vers un (ou plusieurs) noeud(s) spécifique(s) sink/actionneur.

1.2 Les réseaux de capteurs sans fil

La miniaturisation croissante de l'électronique et le progrès des technologies de télécommunication, qui n'ont cessé depuis l'émergence de l'informatique, de produire à faible coût des capteurs communicants peu consommateurs d'énergie. Ces petites entités électroniques, dont l'objectif est de récolter des grandeurs physiques de leur environnement proche (luminosité, mouvement, température, pression barométrique, etc.), et éventuellement de les traiter, constituent les briques de base des réseaux de

capteurs. Il existe un grand nombre de noeuds capteurs sur le marché, allant du capteur cinétique au capteur de champs magnétiques ou du capteur de pollution au capteur de mouvement [1]. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé de :

- Unité d'acquisition : est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogiques-numériques (ADCs). Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques [2]. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
- Unité de traitement : est composée de deux interfaces, une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au noeud de collaborer avec les autres noeuds pour réaliser les tâches d'acquisition, et stocker les données collectées.
- Unité de communication (Transceiver) : elle est responsable de toutes les communications via un support de communication radio qui relie le noeud au réseau.
- Batterie (source d'énergie) : alimente les unités citées précédemment, et il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels : les systèmes de localisation comme les GPS (Global Positioning Systems) et un mobilisateur qui lui permettent de se déplacer.

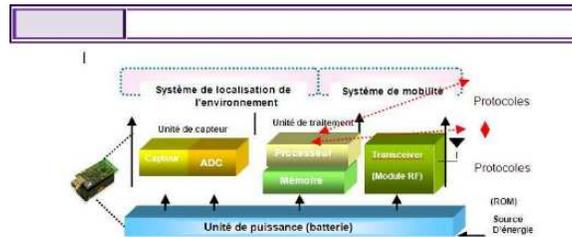


FIGURE 1.1 – Les composants d'un capteur.

Un WSN est un type spécial de réseau ad-hoc défini par un ensemble coopérant de capteurs déployés dans une zone géographique appelée zone de captage ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène quelconque et de récolter des données d'une manière autonome. Les capteurs utilisent une communication sans fil (Radio) pour

acheminer les données captées avec un routage multi-sauts vers un noeud considéré comme "point de collecte", appelé station de base ou noeud sink. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via Internet, réseaux GPRS ou par satellite (figure 1.2).

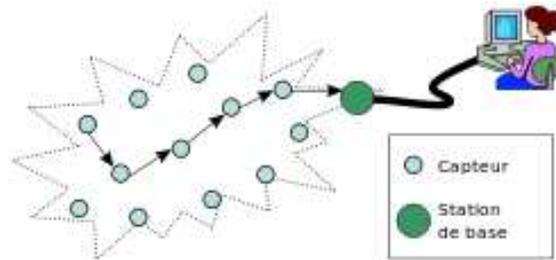


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.

Les principaux défis au niveau des WSNs sont [2] :

- Besoin de mécanismes pour préserver l'énergie au niveau des noeuds capteurs et ainsi maximiser la durée de vie du réseau. Dans la littérature, plusieurs définitions de durée de vie existent et qui peuvent être classifiées en durée de vie basée sur le nombre de noeuds vivants, durée de vie basée sur la couverture et la connectivité, et durée de vie basée sur la qualité exigée par l'application [24].
- Besoin d'algorithmes distribués, localisés et collaboratifs pouvant être exécutés avec des microprocesseurs à faible puissance de calcul et une mémoire limitée.
- Besoin d'un routage multi-sauts sur une topologie dynamique pour acheminer les données à partir des noeuds capteurs vers le(s) noeud(s) sink.

Dans un réseau de capteurs, différents types de trafic peuvent être rencontrés et sont divisés en trois catégories :

- La première catégorie, qui peut être considérée comme le trafic le plus répandu dans les réseaux de capteurs est le trafic dit convergecast (Multi-point to Point) : les données sont générées par les noeuds dans le réseau et envoyées vers un noeud central du réseau appelé sink (puits) afin d'y être traitées.

- La deuxième catégorie est celle où le trafic est généré par le sink et envoyé aux noeuds du réseau (Point to Multi-point).
- Et pour finir, la dernière catégorie est la catégorie Point to Point qu'on peut résumer comme l'échange de données entre deux noeuds quelconques du réseau.

Dans ces différentes catégories, le trafic peut être de type périodique ou non périodique. Dans les réseaux de collecte d'informations par exemple, le type de trafic le plus répandu sera le trafic périodique : chaque noeud après mesure périodique, mesure de la consommation électrique dans un bâtiment par exemple, doit envoyer un paquet. Un autre type de trafic assez représentatif des réseaux de capteurs est le trafic dit événementiel. Nous le retrouvons par exemple dans des applications liées à la surveillance d'une zone donnée. Les capteurs ne transmettent les données qu'après détection d'un événement, par exemple la détection de fuites dans une centrale nucléaire ou pétrolière. Ce trafic sera sous forme de rafale généré à la détection d'un événement. Le troisième type est le trafic à la demande, où un noeud n'envoie les informations qu'à la demande (réception de requête) : nous pouvons citer par exemple les applications de domotique ou de télé surveillance.

1.3 Les réseaux de capteurs et actionneurs

L'Internet des objets et les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil (WSANs) sont en train de devenir la prochaine génération des réseaux de capteurs. La différence majeure entre les WSANs et les WSNs réside dans le fait que les WSANs sont capables de changer l'environnement et le monde physique contrairement aux WSNs. Un WSAN se compose généralement d'un groupe de noeuds capteurs qui sont utilisés pour recueillir les informations de l'environnement, et des noeuds actionneurs qui sont utilisés pour modifier le comportement de l'environnement. Il y a des liaisons sans fil entre les noeuds capteurs et les actionneurs. Les noeuds capteurs détectent et signalent l'état de l'environnement tandis que les noeuds actionneurs collectent les données provenant des capteurs et sont capables d'agir sur l'environnement. Chaque noeud capteur a un micro-processeur avec une faible puissance de calcul, un espace

de stockage limité, une faible puissance radio et une réserve d'énergie réduite. Un actionneur est un noeud dont l'objectif est de convertir un signal électrique de commande à une action physique en se basant sur les informations récoltées par les noeuds capteurs. Comme l'action sur le monde physique exige une énergie souvent importante, les actionneurs disposent généralement d'une source d'énergie abondante. Les fonctions de calcul et de communication au niveau des actionneurs profitent donc de cette richesse en énergie : par conséquent les capacités de calcul et de stockage ainsi que la puissance de transmission au niveau des noeuds actionneurs sont plus importantes que celles au niveau des noeuds capteurs. Dans des applications typiques des WSNs, les noeuds capteurs sont statiques, tandis que les noeuds actionneurs tels que des robots et les êtres humains équipés de véhicules, sont mobiles. Cependant, certains actionneurs tels que les arroseurs dans les systèmes de détection de feu, pourraient être statique. Les noeuds capteurs pourraient également être mobile dans certains scénarios (capteurs mobiles). Par exemple, dans les problèmes de la réinstallation des capteurs, les noeuds capteurs sont tenus de se déplacer à l'emplacement des capteurs défaillants pour la couverture de la zone d'intérêt. Les capteurs et les actionneurs peuvent même être intégrés dans un seul robot qui est capable de détecter et se déplacer. Comparé aux noeuds capteurs, Les noeuds actionneurs ont généralement des capacités plus fortes dans le traitement des données, la communication sans fil, et la puissance d'alimentation [10]. Par conséquent, le nombre de noeuds capteurs déployés dans une zone de surveillance peut être de l'ordre de centaines ou de milliers bien qu'une telle taille n'est pas nécessaire pour les actionneurs étant donné qu'ils ont des capacités plus élevées et peuvent agir sur des grandes surfaces. Pour profiter de la capacité des actionneurs, une communication coopérative efficace doit être mise en oeuvre. Généralement, on trouve dans la littérature trois niveaux de coordination : capteur-capteur, capteur-actionneur et actionneur-actionneur. La coordination capteur-capteur est utilisée pour recueillir des informations dans le domaine de la surveillance. La coordination capteur-actionneur est responsable d'envoyer les données recueillies par des capteurs aux actionneurs. Enfin, la coordination actionneur-actionneur est utilisée pour exécuter les actions appropriées. Par conséquent, les WSNs produisent trois opérations importantes : détection de l'événement, prendre la décision et agir sur l'environnement. Il est à

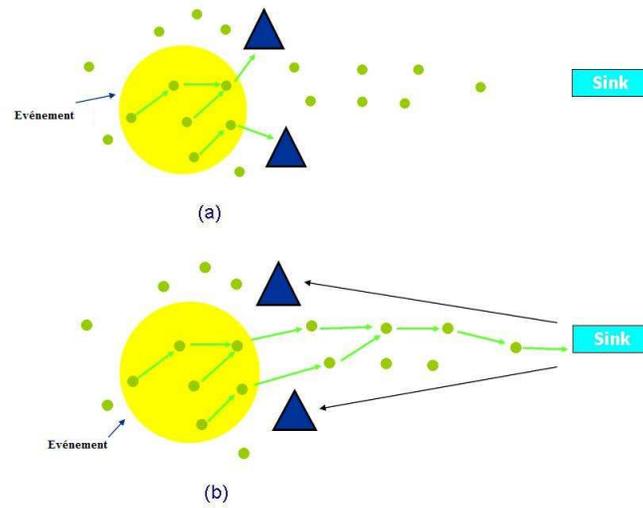


FIGURE 1.3 – (a) Architecture automatique et (b) Architecture semi-automatique.

noter que la coordination dépend de l'architecture du réseau. Dans l'architecture semi-automatique (voir la figure 1.3), la coordination est assurée par la station de base qui est chargée de surveiller et de gérer l'ensemble du réseau. Avec cette architecture, les capteurs envoient les informations recueillies à la station de contrôle (station de base) qui produit des ordres et les envoie ensuite aux actionneurs pour effectuer les actions appropriées. Cependant, la coordination dans l'architecture automatique est fournie sans l'existence d'un contrôleur central, les coordinations capteur-actionneur et actionneur-actionneur sont utilisées pour détecter les événements et trouver les actions appropriées.

1.4 Applications des WSNs

Au cours des dernières années, de nombreux réseaux de capteurs et actionneurs sans fil ont été déployés pour effectuer plusieurs tâches de traitement de l'information. Par exemple, les applications domotiques [33, 18], le contrôle des animaux [13], les applications médicales [8, 17, 6, 26, 7], l'agriculture de précision [15, 28, 21, 16], les

bâtiments intelligents [32, 25, 22], la gestion des égouts [14] et le contrôle des feux de circulation. Le nombre de noeuds capteurs et actionneurs varie selon les types d'applications. Par exemple, dans le système de gestion des égouts et de contrôle des feux de circulation, en raison de la large zone de couverture, le nombre de capteurs et d'actionneurs peut être de l'ordre de plusieurs centaines par rapport à quelques noeuds quand ils sont utilisés pour surveiller les bâtiments. Dans les applications domotiques et de l'agriculture de précision, il y a plus de noeuds capteurs par rapport aux noeuds actionneurs en raison de la zone de couverture. Dans les applications de contrôle des animaux et de surveillance de la santé des infrastructures, il y a le même nombre de capteurs et d'actionneurs, car les noeuds capteurs et actionneurs sont intégrés ensemble.

1.4.1 Caractéristiques des WSANs

Les WSANs sont caractérisés par :

- **La taille du réseau** : un WSAN est composé de quelques dizaines à quelques centaines de noeuds. La topologie obtenue est principalement une architecture multi-sauts.
- **La mobilité des actionneurs** : dans la plupart des applications WSANs, les actionneurs sont généralement mobiles. Autrement dit, la destination peut modifier sa position au cours de la surveillance de l'environnement. Par conséquent, un protocole de routage est nécessaire pour réparer la route afin d'acheminer les données avec succès.
- **Déploiement des noeuds** : généralement les noeuds sont déployés dans des zones hostiles.
- **Gestion d'énergie** : les noeuds capteurs sont généralement alimentés par des batteries. Ainsi, des techniques économes en énergie sont nécessaires pour maximiser la durée de vie du réseau.
- **Hétérogénéité** : les réseaux WSANs sont constitués de plusieurs types de noeuds, à savoir des noeuds capteurs et des noeuds actionneurs. D'une part, les noeuds capteurs ont des capacités limitées (calcul, mémoire, batterie et puissance de transmission). Ces noeuds ne devraient pas normalement parti-

ciper activement à la maintenance de la topologie par exemple sauf pour assurer une connectivité locale ou une couverture appropriée. D'autre part, les noeuds actionneurs sont des noeuds riches en ressources. Ainsi, le réseau doit être conçu et géré de telle sorte que les noeuds à faibles ressources (les noeuds capteurs) ne soient pas trop sollicités pour ne pas épuiser leurs batteries limitées au contraire des noeuds riches en ressources (les noeuds actionneurs) qui peuvent contribuer d'avantage dans le réseau.

- **Coordination** : Le principal paradigme de communication dans WSANs est capteur-actionneur. Par ailleurs en raison de l'existence de multiples actionneurs, des destinations multiples sont possibles ce qui rend la vie des noeuds capteurs plus difficile. Les noeuds capteurs doivent coordonner avec les multiples actionneurs pour sélectionner l'actionneur approprié.
- **Exigence en temps réel** : la communication en temps réel est plus important dans WSANs puisque les actions sont effectuées sur l'environnement juste après la détection de l'événement.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités et les concepts de base relatifs aux réseaux de capteurs et les réseau de capteurs et actionneurs sans fil. Les caractéristiques de ce type de réseaux en termes de flexibilité, coût réduit, et facilité de déploiement offrent plusieurs possibilité de développement dans divers domaines. Nous avons aussi cité quelques applications des WSANs. Aujourd'hui, plusieurs recherche dans WSNs et WSANs sont réalisées vu leurs importances. Ce domaine se porte sur le développement de nouvelles solutions pour de nombreux problèmes, en particulier celui de la routage. Le chapitre suivant se focalise sur les protocoles proposés dans la littérature pour résoudre un tel problème.

Taxonomie des protocoles de routage dans les RCASFs

2.1 Introduction

Les WSNs ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs vastes applications dans les différents domaines mais leurs caractéristiques restent un challenge important. En effet, la limitation des ressources énergétiques et physiques, l'absence de l'infrastructure et la bande passante limitée engendrent des difficultés d'assurer une transmission avec qualité de service [36] ,[4]. Par conséquent, le développement de nouveaux protocoles qui répond à ses exigences est indispensable, notamment les protocoles de routage vu que ces derniers jouent un rôle majeur. La fiabilité, l'entretien de la route, élimination de la latence et l'efficacité énergétique sont quelques exigences essentielles à tenir en compte. Plusieurs approches ont été décrites dans la littérature. Ce chapitre consiste, à illustrer quelques protocoles qui ont été proposés d'une manière générale, suivi d'une analyse approfondie de certaines autres approches ainsi que de leurs protocoles sous-jacents. Cette analyse sera achevée par une étude critique des différents protocoles. Notre travail, porte un grand intérêt sur les propositions, qui traitent les délais et l'énergie en particulier, une section a été consacrée pour cette description.

2.2 Classification

Dans les réseaux de capteurs et actionneurs, les problèmes sont principalement liés aux contraintes d'énergie, mémoire, capacité de traitement et une latence élevée due à la nature du canal radio partagé, ce qui peut générer des coûts très élevés (overhead). Ces coûts peuvent influencer l'envoi des données collectées par un capteur, le choix d'une technique de diffusion de l'information et l'acheminement efficace en matière de ressources sont une priorité majeure, garantir aussi une grande autonomie de ces réseaux est donc important, vu que ces derniers sont généralement déployés dans des zones hostiles.

L'architecture hiérarchique est considérée comme l'une des solutions communément efficaces pour la diffusion et le routage dans les réseaux ad hoc, notamment les réseaux de capteurs [37] mais cette technique exige généralement plus de ressources matérielles pour certains noeuds (comme les clusters heads) et aussi met en place de nombreux d'hypothèses qui peut être couteux. D'un autre coté, plusieurs protocoles géographiques ont été proposés pour résoudre le problème du routage. Cependant, la plupart sont souvent menés à l'échec [29], alors la technique choisit doit être capable de répondre aux exigences et encore assurer un cheminement des informations sans une perte importante d'énergie.

Nous nous intéressons au problème du routage dans WSNAs en remédiant aux contraintes telles que le délai de transmission et l'énergie consommée.

La couche réseau est utilisée pour une mise en oeuvre d'un mécanisme qui permet d'expédier des données jusqu'à leur destination. Dans le mode de routage multi-sauts, la source ne peut pas atteindre directement sa destination. Donc, les noeuds intermédiaires doivent relayer leurs paquets. Les protocoles de routage peuvent être classés en cinq groupes [40] qui figurent dans le tableau suivant :

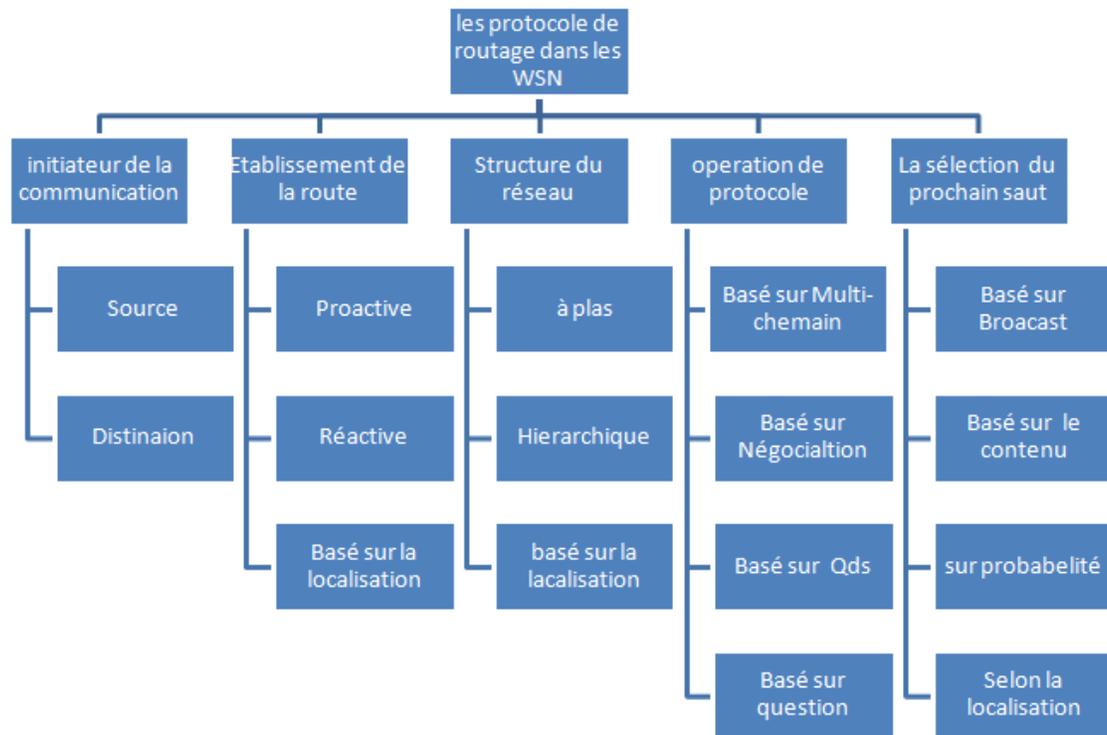


FIGURE 2.1 – Classification de la taxonomie des protocoles de routages dans WSNs [40].

2.3 Étude de quelques protocoles de routage

Notre étude dans ce chapitre est résumée en deux points, le premier consiste à survoler quelques protocoles, et le deuxième contient les détails de ce que nous jugeons intéressant.

2.3.1 Étude général

En se basant sur le type du protocole utilisé, les protocoles de routage peuvent être classés selon la structure du réseau en protocoles plats, géographiques ou hiérarchiques. Les protocoles suivants sont purement basés sur le clusterning, nous allons présenter juste de brèves définitions [27].

APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network)

C'est une extension du protocole TEEN [3], son objectif est de calculer la période de détection d'une donnée qui permettra ensuite, de réagir dans un temps critique. La formation des clusters est faite par la station de base puis des valeurs des attributs sont diffusées par les cluster-heads vers tous les noeuds du réseau. Une agrégation de données est aussi réalisée par les CH dans le but de minimiser l'énergie.

BCDCP (Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol)

Les clusters sont formés par la station de base, c'est à son niveau que l'établissement des routes se fait [9]. Autrement dit, la station de base décide des chemins empruntés en se basant sur les informations récoltés par les capteurs comme l'énergie résiduelle au niveau de tous les noeuds du réseau. Au début, la station de base calcule le niveau d'énergie moyenne de tous les noeuds en lui attribuant un niveau spécifique ensuite, elle choisit un certain nombre de noeud dont le niveau est élevé.

HPAR (Hierarchical Power Aware Routing)

Dans ce Protocole, le réseau est découpé en zones [5]. Les zones sont formées de telle sorte que tous les noeuds qui ont la même localisation géographique doivent appartenir à la même zone. Le protocole est exécuté en deux grandes étapes, la première est la formation de clusters en zones et la deuxième est le routage. Dans

la seconde phase, le routage est introduit d'une façon spécifiée ou le message doit traverser les zones hiérarchiquement d'une manière à maximiser la durée de vie du capteur et pour le réaliser, le message doit être routé tout au long d'un chemin où la puissance des capteurs est supérieure, ce chemin traversé est appelé "Max-Min path".

DHAC (Distributed Hierarchical Agglomerative Clustering)

Est un protocole de routage hiérarchique, son fonctionnement démarre par la création des clusters [30]. Les noeuds ont besoin seulement de connaître le nombre de sauts par rapport à leur voisins. On décrit dans ce qui suit les cinq étapes de la création de ces groupes. Dans la première étape, chaque capteur se présente en tant que un cluster-head et envoie un message Hello, puis une matrice ressemblance sera définie à base des données reçues. Puis, la deuxième étape consiste à exécuter l'algorithme de DHAC, c'est-à-dire chaque cluster détermine sa propre matrice ressemblance et calcule les valeurs des coefficients minimaux, une fois que ces coefficients sont trouvés, le minimum sera élu comme un cluster-head. Au niveau de la troisième étape, l'arbre hiérarchique du cluster peut être découpé, si les clusters dépassent une limite maximale, dans ce cas le contrôle détecte que les conditions n'ont pas été respectés alors l'arbre de ce cluster va être découpé une autre fois. La quatrième étape aborde la taille du cluster, cette dernière peut être contrôlée par une opération appelée "Merge clusters". Enfin, la cinquième étape, réalise l'élection d'un cluster-head et d'après DHAC, on choisit le noeud dont l'identifiant est le plus petit après avoir consulté les valeurs de la première étape pour déterminer le prochain saut.

NHRPA (Novel Hierarchical Routing Protocol Algorithm)

Il est relatif à l'énergie résiduelle des capteurs, à la densité et enfin à la distance d'un capteur vers la station de base [20]. Le capteur dans les WSNs généralement passe par trois opérations. La première est celle de la boucle, la deuxième opération consiste à prendre les décisions et enfin la transmission et dans le cas de cet algo-

rithme, le processus d'initialisation est gardé, les auteurs proposent de réduire les calculs dans les trois opérations citées.

ELCH (Extending Lifetime of Cluster Head)

Cette approche est hybride, elle combine entre l'architecture du cluster et le routage multi-saut, ce qui permet d'économiser l'énergie et prolonger la durée de vie, le fonctionnement est comme suit [19]. Dans la phase d'installation, les clusters sont formés et l'élection du CH est effectuée, chaque noeud vote sur un de ses voisins, et celui qui a le plus grand nombre de voix est élu comme un cluster-head. Dans une deuxième étape, les clusters sont formés de telle manière à ce que chaque clusters aura des capteurs sélectionnés propre à lui, indépendamment de leurs localisations. Un backbone est formé vers les clusters-head, afin de minimiser la consommation d'énergie.

2.3.2 Étude critique

Les protocoles cités ci-dessous sont expliqués d'une manière détaillée, une évaluation sera effectuée, afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chacune :

SLGC (A new Cluster Routing Algorithm in wireless sensor network for decrease energy consumption)

SLGC est un algorithme dédié au routage dans les WSNs [38]. Il divise les réseaux en grilles. L'idée principale de ce protocole est qu'à chaque round, un calcul du centre de gravité de la grille et le seuil de l'énergie sont effectués. Selon ces deux métriques spécifiques, SLGC détermine les noeuds ayant les meilleures performances et les utilise pour élire les clusterheads du cycle actuel. En outre, pour réduire les messages de contrôle, SLGC sélectionne également le cluster-head du prochain cycle dans chaque cycle courant.

SLGC fonctionne par round, il est basé sur le même concept du protocole RCSDN, qui introduit un mécanisme dans lequel la formation du cluster est effectuée dans

des conditions particulières (précédemment citées) en tenant compte de l'état du voisinage et les informations locales d'un noeud. Ce protocole découpe le réseau en grilles et s'exécute en deux phases, la première est la phase d'installation où la structure finale du groupe est formée et les CHs sont élus. Or, la deuxième comporte l'état stable dans lequel chaque noeud enverra les données reçues par les voisins au CH puis les transmettra vers la station de base.

a) Phase d'installation

La station de base démarre le service avec un message initial à tous les noeuds. La prochaine étape consiste à envoyer les informations pertinentes pour le fonctionnement du réseau par les noeuds capteurs vers la station de base, cette dernière divise le réseau en grilles en appuyant sur les données reçues et aussi en tenant compte de la taille du réseau.

Un code doit être exécuté pour retrouver l'ensemble des noeuds candidats pour la configuration initiale. À travers cette liste, les cluster-heads seront déterminés.

b) Phase de régime permanent

Après l'envoi de l'agrégation des données durant un cycle, l'énergie des noeuds est réduite. Par conséquent, le seuil énergétique de base change. Cependant, l'algorithme de SLGC sélectionne à nouveau un autre cluster-head à chaque tour exécuté. Pour ce faire, le protocole calcule un nouveau seuil énergétique en appuyant sur ces résultats obtenus par les capteurs.

Avantages

- SLGC réduit le volume des messages de contrôle pendant chaque cycle. De cette façon, il augmente la durée de vie du réseau.
- Spécification à chaque tour des nouveaux CHs, pour augmenter la durée de vie du réseau.
- Le seuil énergétique est calculé localement.

Inconvénients

- Pas d'équilibre en termes de nombre de noeuds dans les clusters.

- Architecture centralisée qui pourra générer un overhead important.

ADA (Actor-oriented Directional anycast routing in wireless sensor and Actor networks with smart antennass)

ADA est un protocole de routage à plat[41], conçu pour les WSANs visant une amélioration en matière de temps de délivrance de paquets, la latence, la durée de vie du réseau, et la fiabilité. En effet, il exploite les ressources des actionneurs qui sont censés être riches, pour router les informations vers la station de base. C'est-à-dire les actionneurs doivent partager les tâches d'expédition avec les capteurs, d'une manière à assurer l'efficacité, l'interopérabilité entre les capteurs et les actionneurs.

Ce protocole repose essentiellement sur le mode d'envoi anycast, et crée des transmissions sur un axe unifié directionnel grâce à des antennes intelligentes, ces dernières permettent de supporter le trafic arbitraire dans WSANs.

Description du protocole

Dans le but de réduire les retards et la consommation d'énergie totale du réseau global, le protocole ADA utilise les actionneurs autant que possible et il suppose aussi que l'envoi se fait uniquement dans la direction souhaitée. En outre, une approche anycast de routage directionnel est également proposée grâce à des antennes intelligentes. Le fonctionnement en général se déroule par les étapes décrites dans ce qui suit :

Découverte de voisinage

Après l'activation du réseau et afin de découvrir les voisins de chaque noeud, un envoi des messages Hello est effectué. En effet, les capteurs mènent cette découverte sur leur rayon de portée. Lors de la réception, ces derniers calculent leurs emplacements en se basant sur le protocole (LSWD), et ils partagent les informations de localisation les uns avec les autres. Cependant, le message de découverte de voisinage peut échouer dans certaines directions, en raison d'obstacles existants, c'est ce qu'on appelle une défaillance directionnelle. Si cela se produit, un signal directionnel

échec (DF) est utilisé pour le marquer, cela permet d'éviter que ces données soient transférées à cette zone de défaillance.

Découverte de l'actionneur le plus proche

Cette partie consiste à déterminer l'actionneur le plus proche dans chaque région. L'émetteur envoie une requête avec ses propres informations vers la direction de la zone où il souhaite trouver un actionneur. Pendant le processus de transmission, le rapport emplacement de chaque noeud intermédiaire avec l'expéditeur est calculé et cela à base du protocole de localisation LSWD. D'un autre côté, l'expéditeur reçoit la réponse et sélectionne l'actionneur le plus proche en fonction de son rapport emplacement. Si le time-out est écoulé et que le capteur initiant cette découverte n'a reçu aucune réponse. Dans ce cas, l'entrée de l'information de l'actionneur le plus proche aura une valeur nulle.

Découverte des routes

Après la découverte de voisinage et de l'actionneur le plus proche, la source ayant détecté l'événement lance la recherche de la destination si cette dernière n'existe pas déjà dans la table. Cette approche exige seulement des informations sur la localisation de la destination, la source commence par l'envoi de (RREQ) contenant les informations sur beam. Il est à noter que la localisation de la destination se fait en utilisant la même technique de calcul utilisée dans la phase de découverte de l'actionneur le plus proche. De cette façon, ADA obtient l'emplacement relatif de la destination où elle envoie à son tour un message (RREP) avec sa localisation au noeud source.

Les opérations de transfert anycast directionnelles orientées actionneur

L'actionneur le plus proche est sélectionné dans chaque région d'un noeud, ils sont utilisés comme des ancrs pour maintenir la transmission des paquets vers une destination. Le transfert des paquets alors se fait en utilisant une transmission directionnelle, la direction peut être calculée en fonction de l'emplacement relatif de l'expéditeur et du destinataire. À partir de la direction du transfert calculée, ADA détermine l'actionneur le plus proche dans la région correspondante qui devrait être utilisée pour transmettre des paquets à la destination. Dans le cas où l'actionneur

le plus proche n'existe pas, le paquet sera transmis directionnellement à un noeud capteur de la direction de transfert. Les opérations de ce protocole sont illustrées via la figure ci-dessous :

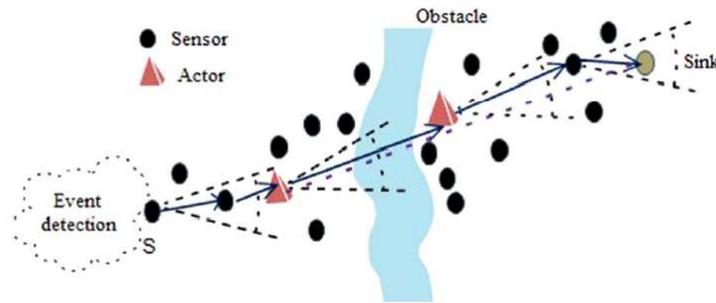


FIGURE 2.2 – Illustration du fonctionnement global du protocole ADA [41].

Quand une entité a des informations à transmettre. Elle consulte sa table de routage, s'il existe un chemin valide à la destination sinon elle lance une autre découverte de la route selon une direction bien précise, ainsi pour avoir cette direction, le protocole utilise les informations sur la destination contenues dans le paquet pour mener la transmission dans le bon sens. En effet, cela permet de retrouver la bonne direction. À chaque réception de données par un capteur ou bien par un actionneur, les mêmes opérations sont répétées durant le processus de l'envoi jusqu'à atteindre la station de base, en essayant de trouver l'actionneur le plus proche à chaque fois sinon le prochain saut sera le capteur le plus proche.

Avantages

- Le protocole ADA prend en considération l'énergie résiduelle des noeuds capteurs lors du routage.
- ADA assure toujours des transmissions même en cas de capteur mort ou en présence d'obstacles.
- Il est basé sur le mode anycast, ce qui permet l'optimisation de l'énergie.

Inconvénients

- Ce protocole fonctionne d'une manière centralisée, par conséquent les délais de réaction seront considérablement longs.

- Il repose sur beaucoup d'hypothèses très couteuses.

LRP-QS (Lightweight Routing with QoS)

LRP-QS est une extension du protocole QBRP dans l'organisation du réseau (proposé par Boukerche, c'est un protocole de routage avec une différenciation de services, dans lequel la génération du chemin se fait en analysant les informations recueillies par les capteurs qui sont ensuite traitées d'une manière centralisée au niveau des actionneurs [23]. Cependant, leur approche élimine les exigences ardues de QBRP comme le processus central et la mise à jour des fréquences. Dans LRP-QS, l'organisation du réseau se fait en supposant que les clusterheads ont une capacité énergétique pareille à celle des actionneurs.

Description du protocole

Les auteurs considèrent un réseau composé d'un grand nombre de noeuds capteurs, de plusieurs actionneurs et d'une station de base qui expriment un ensemble d'intérêts vis-à-vis des informations collectées.

QoS est définie selon le contexte de ce protocole, une capacité du réseau à utiliser efficacement les ressources pour chaque paquet reçu par les capteurs. Les principaux critères en matière de qualité de service sont le taux du flux et l'occupation de la transmission de la bande passante. Le fonctionnement de LRP-QS se fait en quatre étapes décrites dans ce qui suit :

Phase 1 : Création de la zone des actionneurs

Les tables au niveau des capteurs ont deux attributs : identifiant (ID) et nombre de sauts vers un actionneur mais leurs valeurs sont nulles par défaut. En d'autres termes, les noeuds ne connaissent ni l'actionneur ni le nombre de sauts associés.

La configuration du réseau commence par la diffusion des ACP (Area Configuration Packet) par les actionneurs. ACP inclut les IDs d'actionneurs et le nombre de sauts parcourus par un paquet. Quand les noeuds reçoivent le paquet ACP, ils vérifient en premier lieu la valeur du nombre de sauts (des modifications faites à ce niveau).

Phase 2 : Formation de communication backbone

Après leur formation, les zones d'actionneurs ont besoin d'être reliées pour transmettre les données collectées à la station de base.

La station de base commence à former un réseau de communication en zone "Backbone communications" par l'envoi de paquets AIP (Area Integration Packet) avec les IDs de la part de la SB. À la réception des messages AIP, les actionneurs enregistrent l'adresse (DAD) de la SB comme une adresse destinataire et par la suite les messages AIP seront diffusés à tous les capteurs. La figure 2.3 illustre les deux premières phases du Protocole :

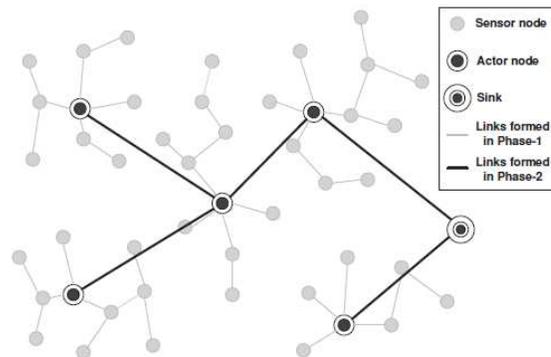


FIGURE 2.3 – Le format du réseau après la deuxième phase [23].

Phase 3 : La souscription d'intérêt (Interest subscription)

Les zones d'intérêts déjà distribuées dans la phase précédente sur les zones d'actionneurs selon le backbone communication en appuyant sur les critères reçus par la station de base, les actionneurs vérifient et modifient leur table d'intérêts suscription, toutes les informations exprimant l'intérêt sont stockées dans la table (type temps, localisation...).

Chaque capteur transmet les intérêts au voisin le plus proche et commence la diffusion, si un capteur est dans la zone d'intérêts de la station de base alors il génère un paquet dès qu'il capte un événement.

À la fin de cette phase, chaque noeud connaîtra exactement le paquet qu'il doit

générer dans le cas où la zone est active et un autre cas se figure, c'est le cas dans lequel les capteurs ont tous leur table de suscription où le chemin vers l'actionneur est donné, cette zone est dite la "zone passive".

Phase 4 : Transmission de données

Cette phase est expliquée par un scénario montrant le déroulement de la transmission avec la définition des paramètres utilisés. Quand un événement est déclenché, le capteur vérifie dans sa table de suscription si le noeud est dans la zone d'intérêt active. Cependant il génère un type de paquets approprié (selon les informations citées dans les étapes précédentes) et il l'envoie à l'actionneur, un pseudo-code est exécuté pour trouver le chemin de routage. Dans LRP-QS, un capteur a une capacité maximale de transmission appelée "output capacity" (C_o), à chaque envoi ce paramètre est réduit et un enregistrement de la nouvelle valeur est effectué, c'est selon ce critère que les modes de transmission sont gérés.

Avantages

- Approche offre une organisation équitable du réseau en se basant sur les poids calculés.
- Hétérogénéité de la structure du noeud.

Inconvénients

- Problèmes liés à l'architecture centralisée.
- Saturation de la mémoire qui peut être engendrée par les enregistrements périodiques.

ESDC (Event-to-Sink Directed Clustering in Wireless Sensor Networks)

Bereketli et al. [38] ont proposé un protocole de routage hiérarchique qui réalise une minimisation d'énergie via une technique basée sur l'événement orienté (driven-event). Selon ce protocole, le processus de clustering se déclenche seulement après la détection de l'événement et il se forme juste dans la direction du flux vers la station

de base. Autrement dit, les clusters ne se forment qu'en cas de nécessité. ESDC réalise une efficacité énergétique avec deux techniques au niveau de la configuration du réseau de capteurs :

- Le regroupement des noeuds se fait seulement dans le corridor du flux de données de l'événement.
- Le regroupement est dirigé uniquement vers la station de base.

Description du fonctionnement

Le fonctionnement global du protocole ESDC franchit plusieurs étapes, premièrement le protocole commence la configuration du réseau après avoir détecté l'événement. En effet, ce regroupement se fait uniquement dans la direction du flux de transmission. Afin de minimiser le taux de transfert, ESDC sélectionne les cluster-heads en appliquant la stratégie "en amont" et "en aval" pour les membres du cluster, ainsi le flux d'événement est acheminé à travers les sélections précédentes, tout au long, il choisit le chemin le plus court de la zone d'événement jusqu'à la station de base. Comme première étape, tous les noeuds du réseau diffusent périodiquement des informations sous forme de balises (Directed Clustering (dconf)) pour maintenir et mettre à jour leurs listes de voisins. Cette balise dconf contient les informations concernant l'énergie, le point, l'emplacement.

De cette façon, les noeuds apprennent les positions de leurs voisins. Ensuite, quand un événement se produit, les capteurs ayant détecté l'événement augmentent leur fréquence d'émission (DCinf), ils mettent un indicateur dans leurs balises (DCinf) périodiques pour signaler l'événement. Par conséquent, les noeuds qui ne prennent pas part au regroupement et au routage de données sont autorisés à économiser de l'énergie par l'application d'un mécanisme spécifique de rapport cyclique et passer en mode de sommeil. Dans ce cas, leur fréquence d'émission est réglée à une valeur beaucoup plus faible que celle dans le trajet d'écoulement de l'événement. En outre, l'en-tête de chaque paquet contient des données comportant des informations sur la localisation et les indications du chemin pour être utilisées dans le regroupement directionnel et le transfert de données. Les noeuds qui reçoivent les balises DCinf envoyées par les détecteurs d'événement, calculent le centre de gravité de l'événement (CGE), c'est-à-dire les noeuds estiment le centre

de l'emplacement de l'événement à partir des informations d'emplacement qu'ils ont.

Élection du cluster-heads

Les noeuds proches de CGE ont plus de chances de devenir des clusters-heads. Dans la région de l'événement, les clusters-head sont sélectionnés selon les valeurs des poids des noeuds. Le poids de chaque noeud est obtenu selon les critères suivants : la distance par rapport à la station de base (d_{sink}), la distance du noeud à la CGE (d_i), le nombre de différents paquets reçus sous forme DCinf des différents capteurs (actifs), l'énergie résiduelle du noeud (E_i).

Formation des clusters et établissement de Routes

L'algorithme du protocole ESDC empêche la formation des clusters de se propager dans le réseau, alors ils sont formés à l'intérieur de la région où l'événement s'est produit en appuyant sur les données transportées par les balises DCinf (beacons). Les données recueillies par les capteurs ayant détecté l'événement sont envoyées à leur cluster-head correspondant, pendant le transport du premier paquet de données, un autre processus est exécuté dans le but d'accomplir la formation du Cluster dans le sens de la station de base (regroupement dirigé). Le cluster-head transmet le paquet à son voisin dont sa position est proche de la station de base, sur ce chemin les noeuds choisissent le prochain saut selon la distance la plus courte, ce chemin est tracé par l'acheminement du premier paquet transmis.

Dans le cas de multi-événements, tous les noeuds transfèrent les données vers la station de base en prenant le chemin le plus court. La formation du cluster est toujours dirigée tout au long du couloir du flux de données, un pseudo-code décrivant les différentes étapes. La figure 4.1 illustre le concept de ce protocole :

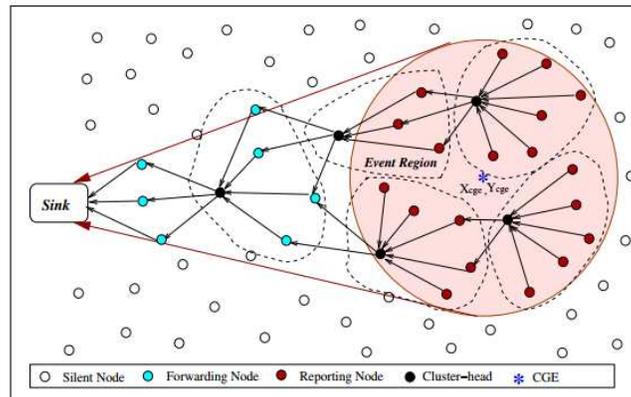


FIGURE 2.4 – Illustration du fonctionnement du réseau [38].

Avantages

- Minimise l'énergie par le regroupement qui se fait seulement dans les zones d'événements et dans la direction de la station de base.
- Réduit le nombre de messages de contrôle.

Inconvénient

- Quoique cette approche réduise considérablement le coût des opérations lors de la formation du cluster, elle ne prend pas en considération l'énergie résiduelle des noeuds lors des transmissions.

VPGR (Virtual Position based Geographic Routing for wireless sensor networks)

Jiaxi You et al. [29] ont proposé un protocole de routage géographique basé sur la technique de virtualisation, la notion introduite consiste à définir des positions virtuelles pour pouvoir repérer les noeuds sans avoir besoin d'utiliser les positions géographiques. Cette position est calculée de telle sorte qu'elle soit le centre du voisinage. En d'autres termes, la position virtuelle reflète le voisinage direct d'un noeud de capteur ainsi la tendance du transfert. Lors de la sélection du prochain saut, le protocole utilise la position virtuelle calculée, cette technique de localisation

augmente le taux de paquets transmis avec succès sans causer une surcharge.

Position virtuelle basé sur le greedy forwarding (en zone)

La position virtuelle d'un noeud est le point central de tous ses voisins directs. Chaque noeud calcule sa position virtuelle selon une équation, et il la diffuse à ses voisins directs. L'information sur la position virtuelle est stockée dans les noeuds eux-mêmes et leurs voisins directs c'est-à-dire chaque noeud connaît sa propre position virtuelle, et celle de ses voisins directs.

Les auteurs ont proposé un algorithme de routage géographique basé sur un système de coordonnées virtuelles (ViP) et qui est strictement localisé, où un noeud possède uniquement les informations de ses voisins directs. Il existe deux variantes du même protocole, appelées Greedy-VIP et MFR-VIP, qui sont basées sur le principe de base des algorithmes connus : Greedy et MFR, respectivement, en introduisant la notion de positions virtuelles.

À la réception du paquet, Greedy-ViP évalue la position virtuelle du noeud courant et celle de ses voisins directs. Selon l'algorithme Greedy, la position virtuelle du voisin sélectionné doit être plus proche de la destination afin de déterminer le prochain saut.

Pour remédier aux limites du protocole qui échoue à chaque fois que les voisins ne possèdent pas une position virtuelle permettant de faire de nouveaux progrès vers la destination, les auteurs ont défini des niveaux plus élevés de cette position virtuelle, et ils ont introduit deux versions améliorées de l'approche proposée, l'une est " Greedy Forwarding with Hierarchical Virtual Position" (HVP) et l'autre est "Restricted Multipath Greedy Forwarding with Virtual Position" (RM-ViP).

Avantages

- Ce protocole réduit le taux de perte de paquets.
- Cet algorithme améliore les performances de QoS.

Inconvénients

- Le protocole HVP échoue quand la position virtuelle des noeuds n'améliore pas le chemin vers la destination.
- Le calcul de position virtuelle engendre une consommation d'énergie.

- Les noeuds capteurs doivent être statiques, donc ce qui n'est pas valable pour les applications qui nécessite un passage à l'échelle. .

HERO (Hierarchical, Efficient and Reliable routing protocol for wireless sensor and actor networks)

HERO est un protocole de routage hiérarchique conçu pour permettre une communication efficace, fiable et multi-hop bidirectionnelle entre les noeuds, qui appartiennent aux différents niveaux [37]. HERO traite d'une manière précise les différents scénarios de la communication que ce soit du capteur vers l'actionneur ou dans le sens opposé.

Les auteurs de ce protocole donnent la main à l'utilisateur de déterminer la fiabilité souhaitée. Ce qui, donne une particularité à ce protocole. Nous allons présenter dans ce qui suit, les différentes étapes de ce protocole ainsi que ses avantages et inconvénients.

Tous les noeuds lancent un processus de communication afin de découvrir les noeuds du même cluster c'est-à-dire l'organisation des noeuds dans un cluster est faite d'une manière automatique.

La découverte et la maintenance de la route

Chaque période "déterminée par l'utilisateur", est une propagation d'un certain nombre d'informations concernant l'identification des CH_s et la table de routage de telle sorte que chaque noeud informe ses voisins (mode rumeur). Après quelques itérations, les noeuds du réseau vont recevoir toutes les informations nécessaires (la table de routage), ce qui permet de tracer un chemin vers un cluster-head donné.

Quatre paramètres sont inclus lors de l'envoi des messages par les capteurs, ils donnent les valeurs aux champs suivants : L : le niveau, GN : le noeud guide, SL : même niveau, UP : niveau supérieure. D'autres paramètres doivent être configurés par des développeurs, ces paramètres sont : la fréquence, la période active et la période inactive. L'utilisateur introduira les valeurs selon le besoin des applications.

Phase de jointure

Dans cette phase, les capteurs utilisent les tables de routage créées pendant la phase précédente et ils envoient une requête contenant une demande d'autorisation d'un clusterhead. La figure résume cette phase :

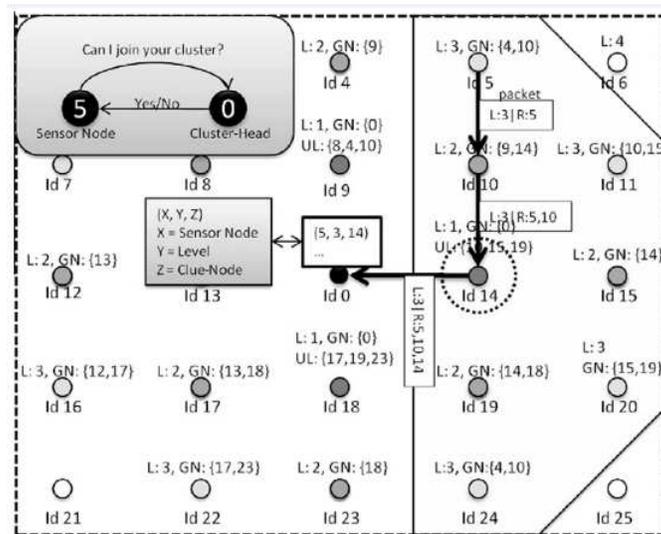


FIGURE 2.5 – Illustration de la phase de jointure [37].

Avantages

- HERO ne repose sur aucune supposition.
- Possibilité de configurer des paramètres par les développeurs selon les besoins de l'application.
- Qualité de lien prise en considération lors de la transmission.
- HERO aborde tous les scénarios de communication possibles.

Inconvénients

- Les routes ne sont pas établies d'une manière efficace en terme d'énergie.
- Chaque phase est mise à jour périodiquement, ce qui peut engendrer un gaspillage d'énergie et un overhead élevé.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un certain nombre de protocoles d'une manière non exhaustive. En parallèle, nous avons détaillé les protocoles les plus récents conçus pour le routage dans les WSAFs en déterminant les concepts sur lesquels se basent les techniques utilisées. Notre étude s'est focalisée sur les protocoles de routage basés sur différentes techniques : le Clustering et aussi celle de l'approche géographique, et enfin les protocoles à plat. Dans le chapitre suivant, nous proposerons un protocole de routage qui évite beaucoup plus les calculs et les échanges des messages de contrôle ainsi que la délivrance de données dans des temps réduits avec un minimum d'énergie consommée.

Nouveau protocole de routage dans les WSNs

3.1 Introduction

À travers l'étude des protocoles de routage dans les WSNs, nous avons montré que le routage avec QdS consiste à déterminer un chemin vers l'actionneur selon des critères bien précis, il faut donc, tenir compte lorsqu'on élabore les étapes d'un protocole de routage des limites des ressources d'un capteur ainsi que les délais de transmission afin de mener une réaction dans un temps très réduit. Et la question qui suit immédiatement la détection d'un événement est « où peut-on trouver l'actionneur le plus proche? », les capteurs seront incapables de répondre à une telle question surtout si ces derniers n'ont aucune connaissance de la position des actionneurs ou au moins des indices pour les trouver, dans ce cas ils doivent encore lancer une diffusion non optimale pour y arriver. Dans ce qui suit, nous présentons le principe de fonctionnement de notre protocole, baptisé E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actuator Tracking) qui permet de réaliser davantage une meilleure estimation en matière de temps et d'énergie.

3.2 Motivation

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au routage avec QoS dans les WSANs. Nous avons élaboré une solution qui peut faire face à la mobilité fréquente des actionneurs. Cette mobilité est considérée comme l'un des obstacles dans ce type de réseau, parce que des modifications sont toujours nécessaires pour gérer la communication capteur-actionneur. Dans notre approche, nous avons exploité plutôt cette mobilité pour avoir de bonnes performances selon deux critères importants : la stabilité d'une route par rapport à la mobilité et la minimisation de la consommation d'énergie. Dans ce contexte, nous y avons apporté une contribution qui permet de garder trace de l'emplacement des actionneurs en effectuant un suivi de leurs déplacements. Ce simple mécanisme est connu sous le nom de Tracking.

Nous avons réduit le nombre de messages échangés dans le réseau par un protocole qui ne forme des routes qu'en cas de nécessité. Donc, nous avons évité de nombreux messages inutiles qui peuvent être traduits en une consommation inutile d'énergie. En outre, le mécanisme utilisé donne la possibilité d'éliminer tout message de contrôle périodique. E²RAT est un protocole qui ne repose et n'exige pas beaucoup d'hypothèses, et on note aussi que notre protocole a été inspiré par l'observation des phénomènes sociaux, chose qui rend ce dernier différent.

Les travaux de recherche dans le domaine du routage des WSANs se sont, jusqu'à présent, focalisés sur l'étude de la manière dont les capteurs fonctionnent. En effet, peu de travaux ont étudié le comportement des actionneurs. Or, l'un de nos objectifs est de réaliser un plus court délai de transmission en observant juste le déplacement de ces actionneurs.

3.3 Propriétés du réseau et hypothèses

Nous considérons notre réseau composé de deux types de noeuds, des capteurs et des actionneurs sans fil dont chacun est caractérisé comme suit :

- Les noeuds capteurs : Sont statiques, homogènes (en matière de capacités de

captage, de communications et d'énergie) et déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt et que chaque noeud connaît ses coordonnées géographiques à l'aide d'un module GPS, et il peut avoir connaissance de son énergie résiduelle à un instant donné. On ne prend pas en considération les défaillances dues à la mobilité involontaire du capteur.

- Les noeuds Actionneurs : Sont mobiles et leur nombre est moins important de celui des capteurs, ils se déplacent librement sans aucune restriction. Les actionneurs sont considérés riches en matière de ressources, les actionneurs formant le réseau ont la même capacité de couverture et de communication ainsi que la quantité d'énergie initiale. La position de l'actionneur se calcule à base des positions géographiques des noeuds capteurs en utilisant la méthode triangulation. La figure 3.1 montre les différents composants du notre réseau, il est à noter que le capteur sont homogène, sauf qu'il peuvent jouer des rôles différents :

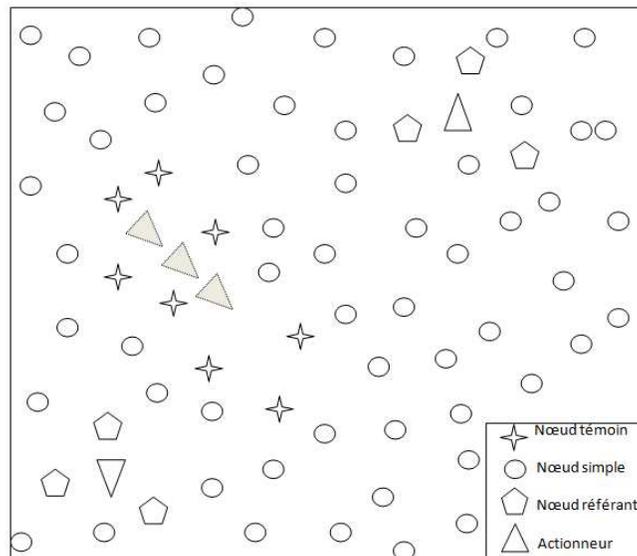


FIGURE 3.1 – L'architecture du réseau.

3.4 Principe du protocole E²RAT

Le protocole de routage E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actuator Tracking) est une solution efficace qui garantit les exigences de qualité de service dans WSNs. Notre protocole repose principalement d'une part, sur la méthode triangulation pour localiser l'actionneur en état stable, d'autre part, en effectuant un Tracking des actionneurs mobiles, afin d'estimer leurs positions. De cette façon, nous avons la possibilité de déterminer l'actionneur le plus proche de la zone d'événement quelle que soit sa situation et pour pouvoir mener une réaction dans les deadlines souhaités.

3.4.1 Aperçu global

Dans notre protocole, nous avons adapté de nouveaux concepts dont le but est non seulement de conserver l'énergie des capteurs qui est l'une des contraintes majeures mais aussi d'assurer une délivrance de l'information dans un temps réduit. Dans la mesure où l'établissement d'une route se fait uniquement à la demande (aspect réactif), cela permet de réduire l'overhead généré par les messages échangés. En outre, chaque noeud maintient dynamiquement une table qui ne sera mise à jour que lors d'un nouveau événement. Pour ce faire, notre solution tire profit de l'information sur le déplacement de ces actionneurs pour acheminer les données captées. Le choix du prochain saut est donc déterminé via ces informations sauvegardées au niveau de cette table. Par conséquent, les capteurs peuvent estimer la trajectoire du mouvement des actionneurs en suivant ces traces. Autrement dit, E²RAT remonte jusqu'à l'actionneur le plus proche. Par la suite, une fois l'un des actionneurs est atteint, la prochaine étape consiste à faire appel à une coordination actionneur-actionneur. Plus précisément, cette couche en coordination est responsable de prendre des décisions et déterminer lesquelles doivent agir sur la partie de la zone d'événement.

Notre réflexion est penchée sur le but de trouver l'actionneur le plus proche en suivant ses traces de déplacement. Afin d'assurer un équilibre entre le gain apporté par le routage avec QdS et l'importance de l'overhead, on injecte des informations utiles sur les délais de croisement des actionneurs et aussi le niveau d'énergie

résiduelle lors de la détection de l'événement. Autrement dit, notre idée est d'exploiter les échanges de données pertinentes pour introduire les informations sur les délais de fréquentation et le niveau d'énergie résiduelle des capteurs et faire les mises à jour nécessaires sans avoir à créer de nouvelles communications.

E²RAT utilise initialement les positions géographiques obtenues à l'aide d'un GPS (auto-localisation) utilisé une seule fois dans la durée de vie du réseau. Ensuite, les capteurs localisent les actionneurs avec la méthode triangulation quand ces derniers sont en état stable, sinon ils lancent une recherche à base des tables illustrées prochainement. En appuyant sur les délais de croisement et un calcul local, les capteurs déterminent le chemin à parcourir, et retransmettent uniquement vers l'actionneur dont la direction est proche de celle du noeud recherché. L'objectif principal est de trouver ce chemin dans un temps très court et avec une minimisation d'énergie pour aboutir aux exigences de qualité de service.

3.5 Description détaillée des phases de E²RAT

La connaissance des positions des actionneurs est une étape cruciale dans plusieurs applications, c'est-à-dire le rapport généralement d'un événement ne suffit pas pour router, donc la localisation ou l'estimation de leurs positions est primordiale. De ce fait, les protocoles de routage basés sur les positions sont fortement conseillés dans ce type de réseau.

Dans ce qui suit, nous décrivons en détails les différentes phases du protocole E²RAT.

3.5.1 Phase d'initialisation

Cette partie se déroule en deux phases : la phase de découverte du voisinage et la méthode de triangulation.

Découverte du voisinage

La phase de découverte du voisinage est exécutée une seule fois lors de l'initialisation du réseau. En effet, les capteurs démarrent un processus d'auto-localisation à l'aide du module GPS installé sur ces dispositifs. Chaque noeud calculera sa position après avoir activé le GPS, les coordonnées sont alors obtenues, les échanges de ces positions ne sont pas nécessaires dans notre approche. Les capteurs désactivent ultérieurement leurs modules GPS pour ne pas gaspiller de l'énergie.

Méthode de triangulation

Le processus de localisation des actionneurs en état stable est déclenché en exploitant les coordonnées obtenues lors de la phase d'initialisation. La méthode de triangulation permet de calculer la position d'un actionneur à partir de celle des trois noeuds sélectionnés comme noeuds de référence.

La triangulation ressemble à la trilatération, mais elle utilise les angles à la place des distances. La position peut être calculée à distance (centralisée au niveau des stations de base) ou par les noeuds eux-mêmes (auto-localisation). Dans les deux cas, la position est calculée en utilisant les lois de la trigonométrie (cosinus et sinus). Dans la localisation à distance, au moins deux stations de base estiment l'angle d'arrivée des signaux du noeud à localiser, et elles calculent la position du noeud qui n'est que l'intersection des deux droites qui partent des deux stations de base avec les deux angles mesurés respectivement [39].

À l'issue de cette phase, tous les noeuds obtiennent leurs positions et parmi eux, il y a ceux qui ont aussi une position de l'actionneur après avoir joué le rôle d'un noeud référence et ils sont les seuls qui disposent de cette information.

Définition de la procédure de Tracking

Dans la plupart des applications des WSNs, les actionneurs sont souvent mobiles, la destination peut changer sa position au cours du temps. Ceci nécessite un protocole de routage adaptatif à cette caractéristique afin de réparer la route et re-

layer avec succès les données d'événement. Pour cela, nous avons défini un mécanisme qui prend en considération le déplacement réguliers des actionneurs. Il s'agit donc de la procédure de Tracking.

Le Tracking dans ce contexte peut être défini par un enregistrement des traces de l'actionneur fréquenté par les noeuds capteurs. Autrement dit, quand l'actionneur est de passage, il informe avec un message Hello les capteurs situés à la portée de sa trajectoire.

Les capteurs lors de la réception, rajoutent les délais de fréquentation à chaque déplacement de l'actionneur, de cette façon, ils récoltent les informations sur les dernières traces de l'actionneur passé dans leur rayon de captage et mettent à jour leur table de croisement. Ces noeuds sont appelés noeuds témoins.

L'actionneur doit en quelque sorte faire le relais de son information sur sa position et sa mobilité. Et d'un autre côté, les noeuds de capteurs continuent à les observer, ce qui nous permet d'atteindre un actionneur ciblé ou estimer sa position.

La procédure de Tracking est illustrée dans la figure suivante qui montre la manière dont l'information est propagée.

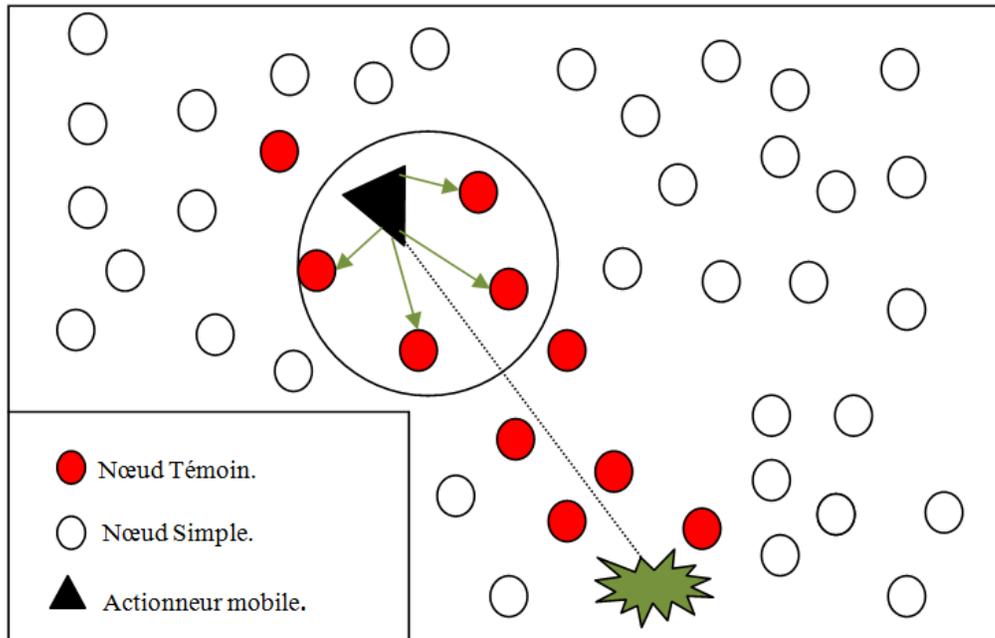


FIGURE 3.2 – Illustration de la procedure de Traking.

3.5.2 Coordination Capteur-Actionneur

Dans cette partie, nous allons décrire le comportement d'un capteur donné de l'instant de détection de l'événement jusqu'à ce qu'il parvienne à l'actionneur. Ce cheminement est réalisé en utilisant les informations stockées au niveau du capteur sous forme de table appelée table de croisement. Cette dernière est mise à jour à chaque nouvelle fréquentation d'un actionneur ou dans le cas de détection d'un nouvel événement.

Le capteur ayant détecté un événement déterminera le prochain saut pour router les informations requises selon le profil que joue ce capteur dans le réseau. Il existe trois scénarios possibles :

1. Le capteur référent : Le capteur référent joue un rôle dans la localisation d'un actionneur stable. Lorsque le capteur référent détecte un événement, il sait

automatiquement l'emplacement de l'actionneur. Par conséquent, ceci est un atout important dans le routage.

2. Le capteur témoin : Lors de la mobilité d'un actionneur, les capteurs témoins mettent à jour leurs tables de croisement. En effet, ils spécifient l'identifiant de l'actionneur mobile, ainsi que l'instant associé à la réception du message "Hello". À la réception des données à acheminer, et pour qu'un noeud capteur décide s'il doit faire suivre la transmission des données ou pas, il consulte sa table de croisement et il récupère le temps de fréquentation le plus récent après il effectue un calcul d'une fonction objectif à son niveau. Ce calcul consiste à comparer son propre temps de fréquentation ainsi que celui qu'il reçoit. Suite à cela, le capteur décide s'il propage l'information, sinon il s'abstient de toute autre action.

Après quelques itérations et après avoir acheminé les informations captées, les capteurs vont recevoir des informations sur l'énergie résiduelle de leurs voisins (comme nous l'avons cité précédemment). Dans ce cas, si un capteur donné reçoit Data et que les délais de fréquentation sont nuls, le noeud capteur sélectionne les voisins dont l'énergie résiduelle est plus grande et envoie les données et injecte aussi son niveau d'énergie et son temps de fréquentation s'il existe. Les noeuds capteur profitent d'échange d'informations pour avoir un aperçu sur l'état du réseau, ce processus est répété jusqu'à ce qu'ils atteignent l'actionneur le plus proche.

3. Le capteur simple : Afin de réaliser une communication entre les noeuds, une fois que l'événement est détecté, les capteurs consultent leur table de croisement, s'ils n'ont pas fréquenté des actionneurs, dans ce cas ils diffusent l'information mais au bout de quelques itérations, cette diffusion sera limitée et la retransmission se fait uniquement vers les noeuds dont la direction est proche de celle du noeud recherché, à l'aide des noeuds témoins qui possèdent les délais nécessaires pour diriger l'envoi, de cette façon, nous réalisons une diffusion optimale. Le but final de cette coordination est d'atteindre l'actionneur avec une convergence dans le sens de l'envoi, en minimisant la quantité de données échangées entre les noeuds. Par conséquent, la consommation énergétique des

noeuds est aussi minimisée et la vie du système est prolongée. La figure 3.3 illustre le fonctionnement de cette phase :

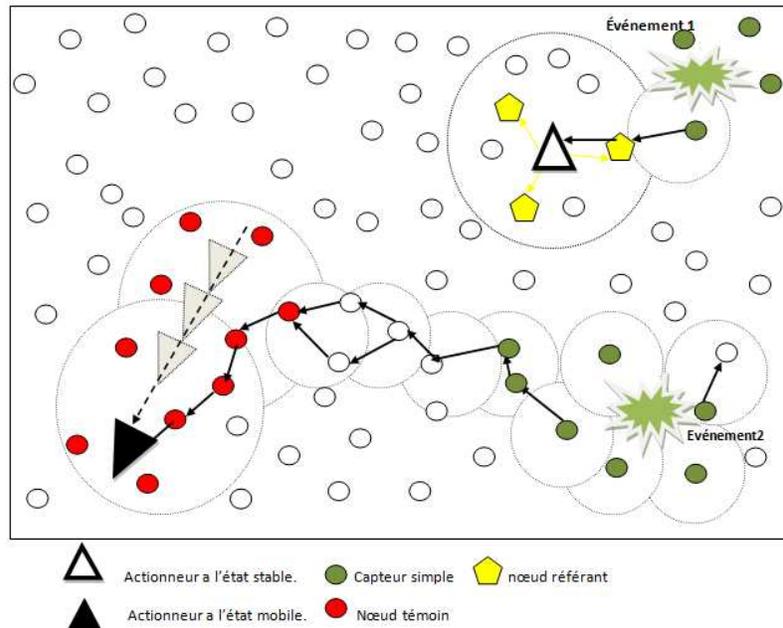


FIGURE 3.3 – Fonctionnement globale de E²RAT.

3.5.3 Table de croisement

Construction de la table

Afin de permettre une communication entre les noeuds du réseau lors de la transmission des paquets, et pour qu'un capteur décide s'il doit faire suivre la transmission des données ou pas, un calcul à son niveau doit être effectué. En se basant sur les informations reçus et stocké sous forme de ligne dans une table d'information nommée table de croisement. Cette dernière contient les instants de fréquentation et aussi les niveaux d'énergie échangés à plusieurs reprises.

Lors du routage de l'information, chaque noeud consulte sa table pour pouvoir

déterminer la destination. en effectuant un calcul qui consiste à comparer le temps de fréquentation consulté dans la table et celui qui a été reçu.

L'ajout d'une ligne dans cette table est limité à trois seulement, pour ne pas charger la mémoire des capteurs avec des informations qui ne sont pas récentes, Chaque noeud maintient cette valeur dans cette table et dans le format suivant la ligne est avec les champs suivants (identifiant-actionneur, délais de fréquentation, niveau d'énergie de l'émetteur).

Maintenance de la table de croisement

La maintenance de la table de croisement garantit une mise à jour lors de la mobilité des actionneurs ou lors de la détection d'un nouvel événement. Cette table est utilisée pour faire router les données captées et déterminer l'actionneur le plus proche à travers les traces sauvegardées dans cette dernière.

Dans un premier temps et dans la phase qui suit le mouvement d'un actionneur, des messages - de petite taille - Hello- sont envoyés par l'actionneur. A la réception de ces indices, Les capteurs à leur tour, calcule l'instant de croisement en mesurant les échanges les balises "Hello" et il ajoute cet instant à cette table comme une nouvelle ligne avec une spécification de ID-actionneur et un temps de fréquentation qui correspond exactement à l'instant dont lequel l'actionneur et le capteur se sont croisés.

À chaque fois que le capteur a une donnée à transmettre ou il a reçu de nouvelles informations, il consultera la table de croisement et il se servira des informations sur le délai de croisement pour effectuer une comparaison qui permet de diriger l'envoi vers l'actionneur le plus proche.

3.5.4 Coordination Actionneur-Actionneur

À la fin de la coordination capteur-actionneur, les capteurs vont achever leurs envois une fois ils arrivent à l'actionneur le plus proche, ce qui indique la terminaison de cette phase. En revanche, un autre type de communication se déclenche, il s'agit de

la coordination actionneur-actionneur, qui permet d'affecter la tâche à l'actionneur adéquat, c'est-à-dire assurer une réaction dans des temps réduits et l'accomplir de manière cohérente.

Deux cas de figure se présentent lors de la réception des données par les actionneurs et qui peuvent perturber le bon fonctionnement du réseau. Soit l'actionneur en question n'est pas disponible et il ne peut pas agir sur la zone de l'événement, en raison de plusieurs facteurs par exemple : exécution d'une autre tâche, énergie insuffisante etc. Ou bien tomber dans une situation où plusieurs actionneurs reçoivent la même information et tous vont se mobiliser, ce qui peut engendrer un overreacting. Après l'analyse de toutes ces situations, la solution est donc la réponse à la question suivante : quel est l'actionneur le plus approprié qui doit exécuter la tâche demandée ?

Donc les actionneurs doivent coordonner les uns avec les autres afin de décider lequel est mieux placé pour effectuer l'action. Nous proposons un mécanisme qui considère la réponse à un événement donné ou chaque tâche nécessite exactement un acteur, cette manière de faire est appelée Single-Actor Task (SAT) [4].

L'actionneur ayant reçu les informations sur l'événement, envoie un message contenant la position du noeud source. En effet la communication entre les actionneurs est supposée être rapide et directe vu que ces derniers sont riches en ressources, ensuite une réponse implicite par tous les actionneurs vers l'actionneur initiant la coordination. Il existe deux réponses possibles, soit un acquittement négatif qui signifie que ce noeud est déjà affecté à une tâche ou dans le cas contraire c'est un accord qui va contenir les informations sur son état et la distance qui le sépare de la zone d'événement. Ces informations reflètent la disponibilité des actionneurs et définissent ainsi lequel devrait exécuter la tâche.

L'actionneur ayant le rôle d'initiateur récolte les réponses de tous les actionneurs puis compare les valeurs reçues durant. C'est-à-dire, pour que l'initiateur décide sur l'actionneur le plus adéquat pour l'exécution de tâches dans les délais les plus optimales, il doit sélectionner l'actionneur le plus proche de la zone d'événement. Ceci est réalisé, en se basant sur les valeurs fournis auparavant. L'actionneur dont la valeur de la distance est plus inférieure sera sélectionné. De cette manière, E²RAT four-

nit une coordination actionneur-actionneur qui garantit un temps d'exécution des tâches réduits même si durant multi-événement. E²RAT exploite les ressources des actionneurs afin de réagir de manière optimale lors de la détection des événements et répond de telle sorte que toute la zone d'intérêt soit couverte. Cette coordination actionneur-actionneur est achevée une fois un actionneurs donné est déterminé.

L'algorithme suivant illustre le fonctionnement de notre protocole et les variables citées caractérisent le type de message sont :

- M-TA : message Hello envoyé par actionneur en état stable.
- M-HA : message Hello envoyé par actionneur lord de sa mobilité vers un événement.
- Tf1 : le temps de fréquentation le plus récent de la table de croisement du capteur.
- Tf2 : le temps de fréquentation ayant extrait du message reçu s'il existe.

Algorithm 1 La coordination capteur-actionneur dans E²RAT

```
1: if receptionM - TA then
2:   exécuter la méthode triangulation.
3:   mettre à jour le niveau d'énergie
4:   mettre à jour de la table de croisement
5:   envoyer aux voisins à un saut
6: else
7:   if receptionM - HA then
8:     mettre à jour la table de croisement
9:     mettre à jour le niveau d'énergie
10:  else
11:
12:    if receptionDATA then
13:      if  $Tf2 < Tf1$  then
14:        injecter Tf1 dans un message DATA
15:        mettre à jour le niveau d'énergie résiduelle Ec et injecter Ec dans mes-
16:        sage DATA
17:        envoyer DATA au voisin
18:        mettre à jour le niveau d'énergie
19:      end if
20:    end if
21:  end if
```

3.6 Conclusion

Ce chapitre traite une solution qui garantit un routage avec qualité de service dans les WSANs, il s'agit du protocole E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actuator Tacking), qui assure malgré une mobilité maximale, une délivrance de paquets et aussi la consommation d'énergie totale du réseau réduite. En effet, E²RAT assure la notion de multi-événements avec un nombre réduit de messages échangés grâce à la technique de Tracking utilisée. Dans le chapitre suivant, nous procédons à la validation de la solution proposée à travers des scénarios de simulation. Cette dernière permet de calculer certains paramètres de performance, tels que les délais et la consommation énergétique dans le but d'évaluer l'efficacité du protocole proposé.

Évaluation de performances

4.1 Introduction

Après avoir détaillé le fonctionnement d'E²RAT, nous procédons dans le présent chapitre à l'évaluation de ses performances. Nous allons présenter dans la première partie les paramètres utilisés lors de la conception du simulateur, puis nous allons discuter les résultats obtenus. La validation d'E²RAT est réalisée en exécutant plusieurs scénarios et en le comparant avec deux autres protocoles. Nous avons utilisé Matlab comme langage de programmation afin de simuler les protocoles et comparer ensuite les résultats en matière de : les délais de bout en bout, taux de paquet perdus et énergie consommée.

4.2 Environnement et paramètres de simulation

Le réseau simulé est un plan carré $500m \times 500m$, où les noeuds de capteurs et actionneurs sont déployés aléatoirement. Les paquets sont générés de façon à ce qu'ils reflètent l'occurrence des événements arbitrairement avec des paires aléatoires d'adresses de source-destination à chaque nouvelle exécution. Alors différents scénarios sont réalisés pour mieux tester le fonctionnement dans la zone simulée.

Initialement, et dans tous les scénarios de simulation le nombre de capteurs est moins important que celui des actionneurs. Nous supposons que la portée de

	<i>capteurs</i>	<i>actionneurs</i>
<i>Nombre</i>	50-70-100	5-15
<i>Portée de communication</i>	25m	40m
<i>Energie initiale</i>	1J	10J
<i>Vitesse de déplacement des actionneurs</i>	/	60m/s

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

communication R de chaque noeud capteur est la même dans tout le réseau, et nous avons utilisé la valeur par défaut de la taille du paquet (8 Octet) et une vitesse de déplacement des actionneurs régulière ainsi que d'autres paramètres cités dans le tableau 4.1, et qui résume la configuration utilisée dans notre simulation.

4.3 Résultats obtenus

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus afin de comparer ses performances par rapport à celles d'un protocole à plat ADA (2016) et l'autre qui est un protocole hiérarchique LRP-QS (2010). Nous maintenons de nombreux paramètres dans le but de démontrer la haute performance de notre approche et évaluer les délais de bout en bout et l'énergie consommée dans le réseau.

Énergie

La figure 4.1 illustre une comparaison de la quantité d'énergie totale consommée par E²RAT avec celle d'ADA et LRP-QS en fonction du nombre d'événements. On remarque à partir de cette dernière que l'énergie consommée par E²RAT est beaucoup plus réduite. Prenant comme exemple, la consommation à 70 événements, E²RAT consomme 2.5j pendant que ADA et LRP-QS consomment presque le double. Cela revient au fait que lors des événements, un trafic de données est généré ce qui si-

gnifie une mobilité élevée des actionneurs. En effet, l'un des avantages d'E²RAT est d'explorer cette mobilité et permettre aux capteurs d'atteindre l'actionneur le plus proche sans avoir à échanger des messages de contrôle ni à consommer beaucoup d'énergie vue que E²RAT élimine tous message périodique. Ainsi, E²RAT est parfaitement distribué chose qui permet d'économiser de l'énergie. D'un autre côté, ADA et LRP-QS élabore un processus purement centralisé où les données captées seront transmises vers la station de base, ce qui peut engendrer un acheminement long. En outre, ADA utilise des antennes intelligentes exigeant une contrainte en plus qui résulte une consommation d'énergie supplémentaires. La diminution de la consommation de l'énergie malgré l'augmentation du nombre d'événement est due au fait que la génération des événement d'une manière comme nous l'avons spécifié précédemment.

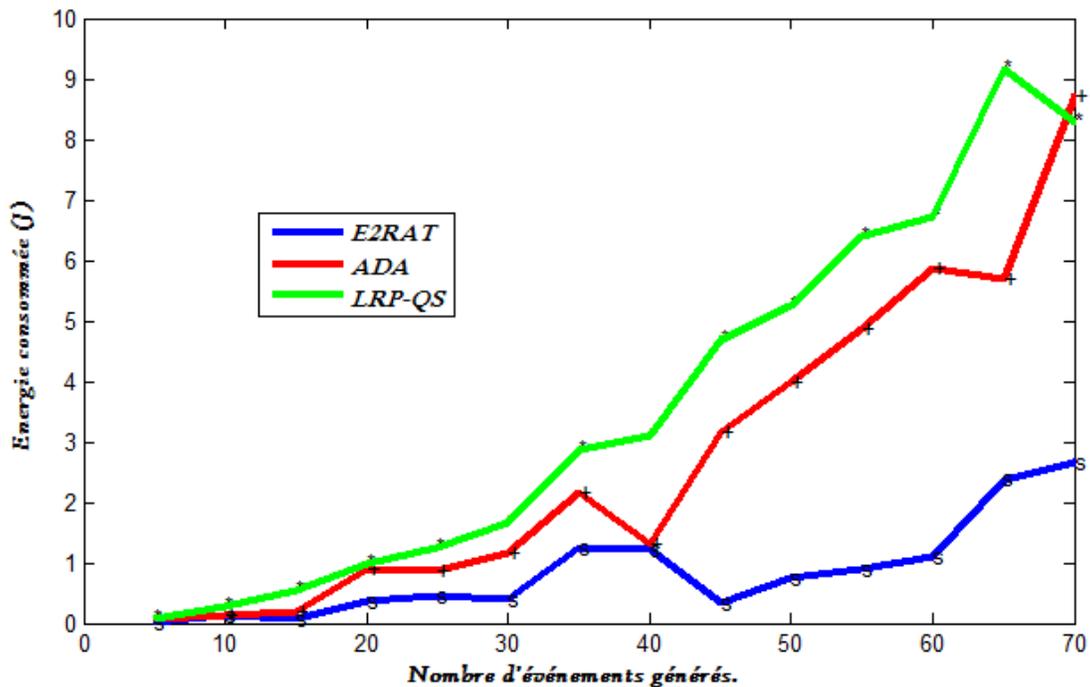


FIGURE 4.1 – L'énergie consommée par le réseau en fonction du nombre d'événement.

Pour les mêmes raisons, il peut être observé dans la Figure 4.2 que la consom-

mation d'énergie en variant le nombre de noeuds dans le réseau lors de l'occurrence de plusieurs événements augmente légèrement malgré cette variation par rapport à ADA et LRP-QS. Cette augmentation est due au fait que le nombre de capteurs participant à l'acheminement augmente aussi. LRP-QS consomme plutôt une quantité considérable car plusieurs traitements sont faits, comme la création des clusters et la détermination de la zone backbone, ceci dégrade les performances.

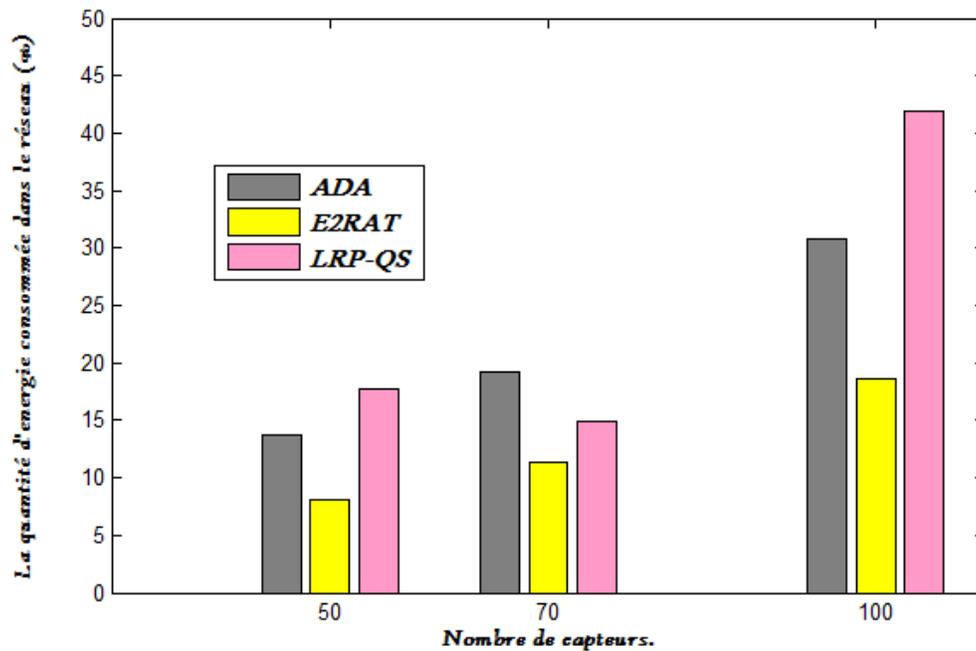


FIGURE 4.2 – Taux d'énergie consommée par le réseau en fonction du nombre de noeuds déployés.

Délai

La figure 4.3 illustre les délais de bout en bout en fonction du nombre d'événements. La Figure 4.4, quant à elle, montre le pourcentage des paquets perdus dans le cas d'un déploiement de 50, 70 et 100 noeuds capteurs. Dans ce contexte, le délai est défini comme la durée de l'instant de détection de l'événement par les capteurs jusqu'à ce que l'actionneur mène l'action, en calculant le nombre de sauts

des paquets de la source à la destination. Quant au taux de transmission de paquets perdus est défini comme le pourcentage de perte lors de la livraison des paquets.

Les résultats de simulation montrent que E²RAT fournit un temps réduit, et ceci est dû à la façon d'établir les routes. En effet, E²RAT achemine les données captées seulement vers l'actionneur le plus proche. Par contre dans le cas du protocole LRP-QS et ADA, l'acheminement s'effectue d'abord à la station de base, puis l'actionneur exécutera la tâche, ce qui engendre des retards significativement élevés. L'architecture centralisée exige que les délais de bout en bout doivent comprendre l'acheminement des données par les capteurs vers la station de base et aussi de cette dernière vers l'actionneur provoquant de cette façon, une latence de délivrance.

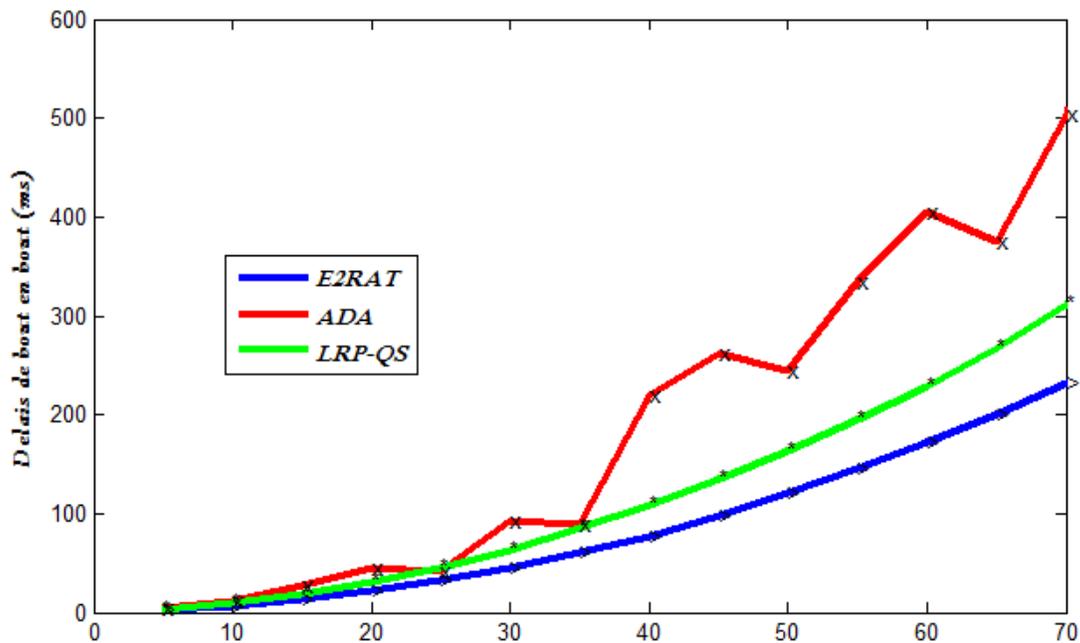


FIGURE 4.3 – Temps de bout en bout en fonction trafic généré.

La figure 4.4 montre l'impact de la densité du réseau sur les performances en fixant le nombre d'événements et en variant la densité des capteurs. Étant donné le taux des paquets perdu reflète la délivrance d'une façon indirecte, nous avons traité ce point lors de notre simulation.

Dans notre approche, et comme nous l'avons déjà cité, la route est établie seulement vers l'actionneur le plus proche ce qui permet d'atteindre des meilleurs temps de réponse aux événements. De l'autre côté, nous constatons que dans le cas de LRP-QS et ADA, les délais sont significativement plus élevés. Cela peut être justifié avec l'architecture centralisée qui signifie que la décision prise par la station de base puis un autre type de communication est pour réaliser l'exécution de la tâche.

D'un autre côté, LRP-QS produit une latence et des paquets perdus à cause de la formation des communications Backbone ou les capteurs devaient le rejoindre pour router les noeuds aussi provoquant des délais en plus.

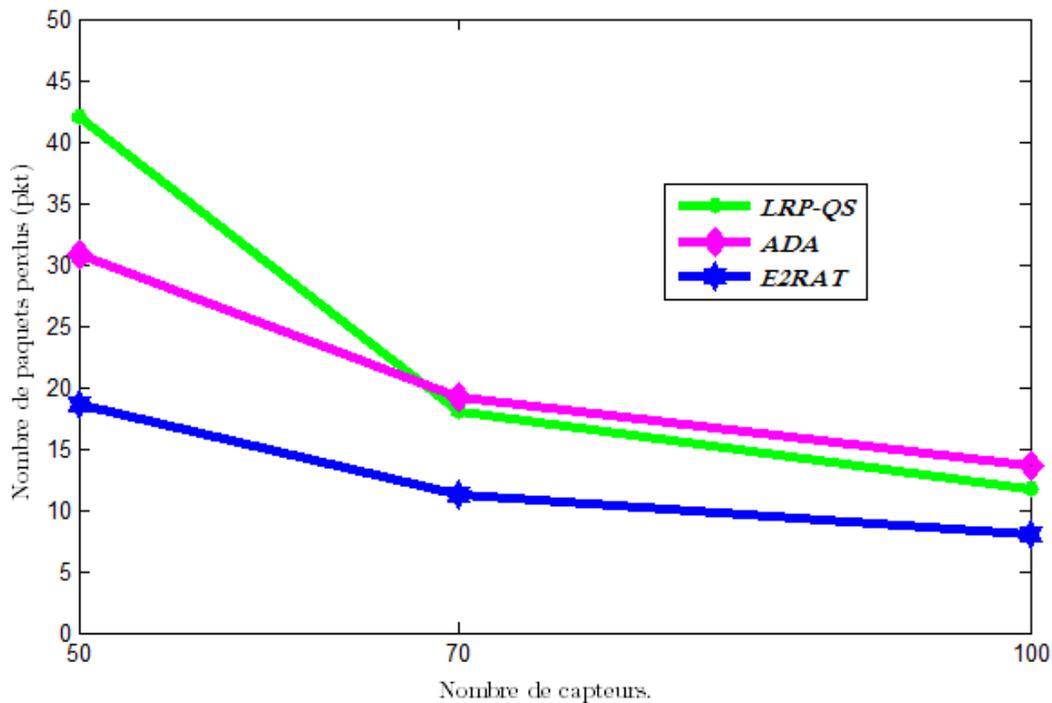


FIGURE 4.4 – Nombre de paquets perdus en fonction du nombre de noeuds déployés.

Ainsi plus le nombre de capteurs augmente plus le nombre de noeuds ayant l'information croît, d'où le nombre de paquets correctement reçus augmente. Et selon les résultats obtenus, nous constatons qu' E²RAT a une meilleure performance par rapport à LRP-QS et ADA.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé l'approche proposée en matière d'efficacité énergétique, taux de paquets perdus et les délais de bout en bout. D'après les résultats obtenus, E²RAT établit les chemins avec une énergie et un délai réduit, ce qui lui permet d'avoir de bonnes performances. Nous avons démontré l'efficacité de cette approche en utilisant des scénarios complètement différents, ainsi que sa robustesse par rapport à la variation du nombre d'événements générés qui influe légèrement sur les performances du protocole.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était de proposer une solution pour le problème du routage avec qualité de service dans les WSANs. Le déploiement dense et aléatoire des capteurs d'un côté, et les contraintes liées aux caractéristiques du capteur telles que l'énergie, la mémoire, la capacité de traitement et une latence élevée, d'un autre côté engendrent principalement une difficulté d'assurer un routage avec une QoS. Cette dernière qui peut être définie, comme une notion qui reflète les besoins des applications en matière de qualité de fonctionnement. Dans ce cadre, nous l'avons abordé en termes d'énergie et de délai. En outre, la mobilité fréquente des actionneurs peut engendrer d'une façon indirecte une consommation inutile d'énergie, ce qui résulte une diminution de la durée de vie du réseau.

Dans ce travail, nous avons pu aboutir à une contribution qui résout le problème du routage dans les WSANs. Dans cet axe, nous avons constaté après avoir mené une étude critique des travaux faits dans la littérature qu'assurer un compromis entre la consommation d'énergie et les délais de délivrance des informations captées est la notion la plus importante. D'où l'idée d'élaborer un protocole qui transforme cette mobilité plutôt en information qui fournit une estimation de position d'actionneur. Nous avons proposé E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actor Tracking), un protocole à plat, basé sur un mécanisme de Tracking qui permet d'estimer les positions des actionneurs. En effet, notre approche consiste à mettre en place un protocole pro-active à base des concepts qui permettent de répondre aux exigences de QoS des WSANs. E²RAT est une solution efficace, en matière d'énergie consommée, délai en réduisant l'overhead.

À travers la simulation, nous avons montré que la solution proposée rivalise parfaitement avec des solutions existantes récemment. Les scénarios de simulation réalisés et les résultats comparatifs montre les bonnes performances de notre approche. Donc, E²RAT est capable de réaliser un compromis entre l'énergie et le délai.

Comme perspectives de recherche, le traitement de la mobilité des capteurs est l'une des hypothèses de notre travail, est que les capteurs restent statiques après leur déploiement. En effet, il s'agira de réévaluer la routage en fonction de la mobilité des capteurs . Nous avons proposé une solution basée sur la connaissance des positions, et donc l'intégration d'un dispositif GPS permettant la localisation induit une consommation d'énergie supplémentaire ainsi qu'un coût de production plus élevé. D'autres perspectives concernant la validation par méthodes mathématiques et analytiques telles que la modélisation par chaines de Markov, files d'attente etc.

Ce travail a été soumis a une conférence : (IEEE CSE 2016 : 19th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2016)).

Bibliographie

- [1] L. C. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Floor acquisition multiple access (fama) for packet-radio networks. In In Conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication (SIGCOMM), pp.262-273, Cambridge, Massachusetts, USA, ACM, (1995).
- [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci . Wireless sensor networks : A survey. Computer Networks, vol.38(4), pp.393-422, (2002).
- [3] A. Manjeshwar, & Agrawal, D. P. APTEEN : A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. In Ipdps Vol.2, pp.48-53, (2002).
- [4] Ian F. Akyildiz, Ismail H. Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks : research challenges in Ad Hoc Networks 2, Elsevier B.V. vol.2, pp.351-367, (2004).
- [5] Al-karaki, Jamal N. et KAMAL, Ahmed E. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. IEEE wireless communications, vol.11, pp.6-28, (2004).
- [6] J.P. Lynch, K.J. Loh, and R. Swartz. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. Shock and Vibration Digest, vol.38(2), pp.91-128, (2005).
- [7] E. Johnson, R. Govindan, and K. Chntalapudi. Structural damage detection using wireless sensor-actuator networks. In In IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation, Budapest, Hungary, june (2005).

- [8] E. Sazonov, R. Jha, K. Janoyan, and V. Kidshnamurthy. Wireless intelligent sensor and actuator network (wisan) : a scalable ultra-low-power platform for structural health monitoring. In *In Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems*, (2006).
- [9] Huang, Guangyan, Xiaowei Li, and Jing He. "Dynamic minimal spanning tree routing protocol for large wireless sensor networks." *Industrial Electronics and Applications*, 2006 1ST IEEE Conference on. IEEE, (2006).
- [10] T. Melodia, D. Pompili, VC. Gungor, and IF. Akyildiz. Communication and coordination in wireless sensor and actor networks. *IEEE Trans Mobile Comput*, vol.6(10), pp.1116-1129, (2007).
- [11] G. Zhao, X. Liu, M.Sun. Anchor-based geographic routing for sensor networks using projection distance. *Proceedings of ISWPC-07*, (2007).
- [12] G. Zhao, X. Liu, M.Sun. Energy-aware geographic routing for sensor networks with randomly shifted anchors. *Proceedings of WCNC-07, IEEE*, pp.3454-3459, (2007).
- [13] T. Warkand C. Crossman, Y. Guo W. Hu, P. Valencia, P. Sikka, P. Corke, J. Henshall C. Lee, K. Prayaga, J. O-Grady, M. Reed, and A. Fisher. The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control. In *in Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Cambridge, MA, USA, (2007).
- [14] M.Wan and P. Lemmon. Distributed flow control using embedded sensor-actuator networks for the reduction of combined sewer overflow (cso) events. In *IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA,(2007).
- [15] V. Narasimhan, A. Arvind, and K. Bever. Greenhouse asset management using wireless sensor-actor networks. In *In IEEE Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*, Papeete, French Polynesia, Tahiti, (2007).
- [16] X. Yang, X. Guo, M. Zhou, L. Wang, and Y. Zhou. A design of greenhouse monitoring and control system based on zigbee wireless sensor network. In *ACM Mobicom*, Montreal, (2007).
- [17] X. Zhao, H. Gao, G. Zhang, B. Ayhan, F. Yan, C. Kwan, and J. Rose. Active healthmonitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sen-

- sensor/actuator network : I. defect detection, localization and growth monitoring, smart materials and structures. IOP Publishing Ltd, vol.16(4) :1208, (2007).
- [18] M. Gauger, D. Minder, P.J. Marron, A. Wacker, and A. Lachenmann. Prototyping sensor-actuator networks for home automation. In In Proceedings of the Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks, Glasgow, Scotland, (2008).
- [19] Lotf, J. J., Bonab, M. N., & Khorsandi, S., A novel cluster-based routing protocol with extending lifetime for wireless sensor networks. In 2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'08), pp.1-5, IEEE, (2008).
- [20] Cheng, H. B., Geng, Y., & Hu, S. J. NHRPA : a novel hierarchical routing protocol algorithm for wireless sensor networks. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, vol.15(3), pp.75-81, (2008).
- [21] R. Evans, W. Iversen, and Y. Kim. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.57(7), pp.1379-1387, (2008).
- [22] S. Liu, D. Tu, and Y. Zhang. Multiparameter fire detection based on wireless sensor network. In In Intl. Conf. on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Shanghai, China, (2009).
- [23] M.I. Akbas, and D. Turgut. Lightweight Routing with QoS Support in Wireless Sensor and Actor Networks. In School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Central Florida Orlando, Florida, (2009).
- [24] I. Dietrich and F. Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, vol.5, pp.1-39, (2009).
- [25] J. Capella, A. Bonastre, J. Serrano, and R. Ors. A new robust, energy-efficient and scalable wireless sensor networks architecture applied to a wireless fire detection system. In In Intl. Conf. on Wireless Networks and Information Systems, Shanghai, China, december (2009).
- [26] J.P. Lynch and R. Swartz. Strategic network utilization in a wireless structural control system for seismically excited structures. Journal of Structural Engineering, vol.135(5) pp.597-608, (2009).

- [27] Lehsaini, Mohamed. Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. Thèse de doctorat : Informatique. Tlemcen : université Abou Bekr Belkaid, (2009).
- [28] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, and I. Robla. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry : State of the art and current trends. *Sensors*, vol.9(6), pp.4728-4750, (2009).
- [29] J. You, Q. Han, D. Lieckfeldt. Virtual position based geographic routing for wireless sensor networks, In *Computer Communications*, vol.33, pp.1255-1265, (2010).
- [30] C. H. Lung, C. Zhou, Using hierarchical agglomerative clustering in wireless sensor networks : An energy-efficient and flexible approach. *Ad Hoc Networks*, vol.8(3), pp.328-344, (2010).
- [31] A. Nayak et I. Stojmenovic. Wireless sensor and Actuator networks. In Jonh Wiley & Sons (Eds), Hoboken, New Jersey, (2010).
- [32] J. Paradells and C. Gomez. Wireless home automation networks ; a survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, vol.48(6), pp.92-101, (2010).
- [33] S. Wu and P. Noy. A conceptual design of a wireless sensor actuator system for optimizing energy and well-being in buildings. *Intelligent Buildings International*, vol.2, pp.41-56, (2010).
- [34] G.A. Shah, M. Bozyigit and FB. Hussain. Cluster-based coordination and routing framework for wireless sensor and actor networks, In *wireless communication and mobile computing Wirel.* vol.11, pp.1140-1154, (2011).
- [35] H. Salarian, K. W. Chin, and F. Naghdy. Coordination in wireless sensor-actuator networks : A survey. *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol.72, pp.856-867, (2012).
- [36] H. Salarian , K. Chin, F. Naghdy. Coordination in wireless sensor-actuator networks. In *J. Parallel Distrib. Comput*, Elsevier Inc, vol.72, pp.856-867, (2012).
- [37] E. Cañete, M. Díaz, L. Llopis, B. Rubio. HERO : A hierarchical, efficient and reliable routing protocol for wireless sensor and actor networks. In *SciVerse Science Direct Computer Communications*, Elsevier Inc, pp.1392-1409, (2012).

-
- [38] A.G. Delavar, S. Shamsi, N. Mirkazemi, J. Artin. SLGC : A new Cluster Routing Algorithm in wireless sensor network for decrease energy consumption. In International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA) Vol.2, No.3, Iran, (2012).
- [39] Dalce Réjane. Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur, Thèse de doctorat : Informatique, université de Toulouse, (2013).
- [40] S.P. Singh et C. Sharma. A Survey on cluster based routing protocols in wireless sensor networks. In : proceedings of the International Conférence on Advanced Computing : Technologie and Application, pp.687-695, (2015).
- [41] Thanh D. Thanh hK. Younghan Actor-oriented directional anycast routing in wireless sensor and actor networks with smart antennas. IN Wireless New Springer, Science& Business Media, New York, (2016).

RÉSUMÉ

Dans les WSANs, garantir un compromis entre la consommation de l'énergie et les temps de bout en bout est considéré comme l'un des grands défis. Particulièrement, quand la mobilité des actionneurs est très fréquente. Cette dernière peut générer l'overhead du aux changements de topologie, ce qui peut engendrer des modifications introduites périodiquement dans le but de maintenir la communication capteur-acteur. Dans ce mémoire, nous avons proposé un nouveau protocole nommé E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actor Tracking). E²RAT exploite la dynamique des acteurs pour pouvoir effectuer un suivi des actionneurs par les noeuds capteur ainsi la transformer en gains en matière de délai et d'énergie. E²RAT optimise considérablement la recherche de la route en utilisant les informations sur la position sauvegardée au niveau des capteurs. Dans le but d'évaluer les performances de notre solution, nous avons obtenu des résultats qui démontrent son efficacité en matière de délai et énergie.

Mots clés : réseaux de capteurs et actionneurs, orienté-acteur, Suivi, mobilité, coordination.

ABSTRACT

In WSANs, one of the major challenges of routing protocols is to ensure the trade-off between energy consumption and end-to-end delay, especially, where the mobility of actors is highly frequent. The mobility can generate overheads since it needs a topology change, and requires modifications that should be introduced periodically in order to maintain sensor-actor communication. In this paper, we propose a new protocol called E²RAT (Efficient Estimation Route based-on Actor Tracking). E²RAT exploits the actors dynamicity in order to track the latters by the sensor nodes, and hence gains in terms of energy and delay. E²RAT optimizes considerably the route request diffusion using some positioning information stored by the sensor nodes. In order to evaluate the performances of our solution, we have performed simulations, where the obtained results demonstrate its efficiency in terms of energy consumption and delay.

Key words : Wireless sensor and actor networks, Tracking, mobility, Actor-oriented, Coordination.