

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

Université Ferhat Abbas de Sétif 1

Faculté des Sciences



Thèse de Doctorat

En Sciences

Option

Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Maintien de la Connectivité dans les Réseaux
Ad hoc sans fil

Présenté par

Abdelmalek BOUDRIES

Devant le jury :

Abdelouahab	MOUSSAOUI	Président	Prof.	Sétif 1
Abdellah	BOUKERRAM	Examineur	Prof.	Béjaia
Fouzi	SEMCHEDINE	Examineur	MCA	Sétif 1
Mohammed	BENMOHAMMED	Examineur	Prof.	Constantine 2
Makhlouf	ALIOUAT	Rapporteur	MCA.	Sétif 1
Patrick	SIARRY	Invité	Prof.	Paris Créteil

Année 2014

Dédicaces

*A la mémoire de mon très cher père,
A ma très chère mère,
A ma très chère femme Foufa et toute sa famille,
A mes très adorables enfants Ramy et Ryma,
A mes frères et soeurs,
A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment,*

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

MERCI à mes parents pour leur patience et leur soutien indéfectible qui m'ont été plus qu'indispensables durant toutes mes études. Des remerciements exceptionnels vont à mon épouse Foufa qui m'a aidé et supporté durant toutes mes années d'inscription.

Mes très vifs remerciements vont à l'encontre de mon directeur de thèse, le Dr. Makhlouf ALIOUAT de l'université de Sétif 1, pour avoir accepté de m'encadrer et de m'orienter tout au long de ce travail.

Je remercie également le Pr. Patrick SARRY de l'Université Paris-Est Créteil (UPEC - France), pour tous ses conseils très précieux et ses orientations qui m'ont été très bénéfiques, et je le remercie pour avoir accepté mon invitation.

Un grand remerciement va aussi au Pr. Abdelouahab MOUSSAOUI, de l'université de Sétif 1, pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. Et un remerciement exceptionnel va au Pr. Abdallah BOUKERRAM, de l'université de Béjaïa, au Dr. Fouzi SEMCHEDINE, de l'université de Sétif 1, et au Pr. Mohammed BENMOHAMMED, de l'université de Constantine 2, pour avoir accepté de juger ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Un grand remerciement va aux Dr. Rabah KASSA, Dr. Mourad AMAD, Dr. Abderrahmane BAADACHE, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Table des matières

Introduction Générale	3
1 Généralités sur les réseaux ad hoc et les RCSFs	4
1.1 Introduction	4
1.2 Essor des réseaux de capteurs	4
1.3 Réseaux sans fil	5
1.3.1 Réseaux ad hoc	6
1.3.2 Réseaux de capteurs sans fil (RCSF)	6
1.3.2.1 Définition d'un nœud capteur	6
1.3.2.2 Composants d'un nœud capteur	7
1.3.2.3 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	8
1.3.2.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil	9
1.3.2.5 Objectif de base des RCSFs	10
1.3.3 Comparaison réseaux de capteurs et réseaux ad hoc	11
1.4 Architecture de communication d'un RCSF	12
1.5 Pile protocolaire dans un RCSF	12
1.6 Applications des RCSFs	13
1.6.1 Applications environnementales	14
1.6.2 Applications médicales	16
1.6.3 Applications de la sécurité	17
1.6.4 Autres applications additionnelles	17
1.7 Standards des réseaux Ad hoc	17
1.7.1 IEEE 802.15.1	17
1.7.2 IEEE 802.15.3	18
1.7.3 IEEE 802.15.4	18
1.7.4 Alliance ZigBee	19

1.7.5	IEEE 1451	20
1.8	Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSFs	21
1.8.1	Tolérance aux pannes	21
1.8.2	Passage à l'échelle (Scalabilité)	21
1.8.3	Système d'exploitation	21
1.8.4	Sécurité limitée	22
1.8.5	Coût de production	22
1.8.6	Environnement	22
1.8.7	Topologie du réseau	23
1.8.8	Contraintes matérielles	23
1.8.9	Média de transmission	24
1.8.10	Connectivité	25
1.8.11	Consommation d'énergie	25
1.9	Conclusion	26
2	Etat de l'art sur les approches de remplacement d'un nœud défaillant	27
2.1	Introduction	27
2.2	Classification des approches de maintien de la connectivité	27
2.2.1	Maintenance préventive	28
2.2.2	Maintenance curative	29
2.2.2.1	Approche DARA	30
2.2.2.2	Approche C^3R	31
2.2.2.3	Approche AOM	33
2.2.2.4	Approche Grid-Quorum	35
2.3	Conclusion	38
3	Détection et remplacement d'un nœud défaillant pour le maintien de connectivité	39
3.1	Introduction	39
3.2	<i>DRFN</i> : Approche de détection et de remplacement d'un nœud défaillant	39
3.2.1	Exemple de scénario	45
3.2.1.1	Cas 1 : défaillance d'un seul nœud	46
3.2.1.2	Cas 2 : défaillance multiple 1	46
3.2.1.3	Cas 3 : défaillance multiple 2	47
3.3	Evaluation	47

3.3.1	Paramètres de simulation	47
3.3.2	Distance parcourue et le nombre de nœuds impliqués pour restaurer la connectivité	48
3.3.3	Pourcentage de réduction de la couverture réseau	50
3.3.4	Overhead additionnel	52
3.4	Conclusion	53
4	Remplacement d'un nœud défaillant en utilisant une table de voisins à deux sauts	55
4.1	Introduction	55
4.2	2HTA : Approche de remplacement à la chaîne d'un nœud défaillant en utilisant une table de voisins à deux sauts	56
4.3	Evaluation	61
4.4	Conclusion	63
5	Protocole Max-Weight et maintien de la connectivité	64
5.1	Introduction	64
5.2	Maintien de la connectivité et routage	65
5.3	Protocole Max-Weight	67
5.4	Evaluation par un exemple	70
5.5	Conclusion	76
	Conclusion Générale & perspectives	79

Liste des tableaux

4.1	Poids des voisins d'un et de deux sauts	57
4.2	Voisins à deux sauts	57
4.3	Poids des voisins d'un et de deux sauts de nc_1	58
4.4	Voisins à deux sauts de nc_1	58
4.5	Election	61
4.6	Comparaison entre l'approche CMWSN et l'approche 2HTA	62
5.1	Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	67
5.2	Pourcentages d'énergie des nœuds capteurs situés entre les nœuds S et D	71
5.3	Détails de transfert de données entre les nœuds S et D	72
5.4	Détails de transfert de données entre les nœuds S et D pour chaque chemin	72
5.5	Récapitulatif des résultats obtenus	73

Table des figures

1.1	Réseau de capteurs sans fil	5
1.2	Composants d'un nœud capteur	7
1.3	Réseau de capteurs dans le domaine médical	9
1.4	Architecture de communication d'un RCSF	12
1.5	Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil	13
1.6	Applications des RCSFs	14
2.1	Classification des approches de maintien de la connectivité	28
2.2	Exemple de scénario avec l'approche DARA	31
2.3	Exemple de fonctionnement de l'approche C^3R	32
2.4	Exemple de scénario où tous les nœuds voisins du nœud défaillant sont critiques	34
2.5	Modèle du système	35
2.6	Critère d'arrêt de la propagation de requêtes	37
3.1	Variation du poids des nœuds capteurs selon le nombre de voisins directs (% d'énergie et distance sont fixées)	41
3.2	Distance entre deux voisins d'un nœud donné	44
3.3	Distance max entre les voisins d'un nœud donné	45
3.4	Réseau connecté de nœuds capteurs susceptibles de se déplacer	45
3.5	Nombre de déplacements de capteurs par unité de temps avec les approches $DRFN$ et C^3R	48
3.6	Différence du nombre de déplacements entre $DRFN$ et C^3R par unité de temps	49
3.7	Nombre de déplacements par unité de temps pour une période de temps de 1320 sec	49

3.8	Différence du nombre de déplacements entre <i>DRFN</i> et <i>C³R</i> pour une période de temps de 1320 sec	50
3.9	Réduction du champ de couverture pour les populations de nœuds de 75 et 200 en faisant varier le rayon de captage	51
3.10	Messages overhead	52
4.1	Réseau connecté de nœuds capteurs susceptibles de se déplacer	57
4.2	Organigramme associé à l'algorithme 4	60
5.1	Exemple de calcul du poids des nœuds capteurs	69
5.2	Exemple de réseau	71
5.3	Nombre de paquets envoyés suivant le taux d'énergie consommée	74
5.4	Différence de paquets envoyés avant la défaillance du premier nœud entre les approches de routage avec et sans mise à jour en fonction du taux d'énergie consommée.	74
5.5	Temps écoulé avant la défaillance du premier nœud en fonction du taux d'énergie consommée.	75
5.6	Différence de temps avant la défaillance du premier nœud entre les deux approches, avec et sans mise à jour de route, en fonction du taux d'énergie consommée.	75

Table des abréviations

Abréviation	Signification
ADC	Analog-to-Digital Converter
CMWSN	Connectivity Maintenance in the Wireless Sensors Networks
DRFN	Detection and Replacement of a Failing Node
FFD	Full Function Device
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MWP	Max-Weight Protocol
PNC	Piconet Coordinator
Rc	Rayon de communication
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
VBR	Variable Bit Rate
WINS	Wireless Integrated Network Sensors
WPAN	Wireless Personal Area Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router
MANETs	Mobile Ad hoc NETworks
2HTA	Two hop Table Approach

Résumé

La durée de vie dans un réseau sans fil, en particulier un réseau de capteurs sans fil dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité tels que : le manque d'énergie au niveau d'un nœud important, infection d'un nœud vital par un code malveillant, une défaillance logique ou physique d'un nœud primaire etc. Cette rupture peut conduire dans certains cas à une reconfiguration du réseau en engendrant ainsi un overhead préjudiciable ou dans d'autres cas à un échec de la mission assignée au réseau. Dans cette thèse, nous avons proposé trois approches portant sur le maintien de la connectivité pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans fil.

Mots clés : Connectivité, Couverture, Réseaux de capteurs, Défaillance.

Abstract

The lifetime in a wireless network, in particular a wireless sensors network depends strongly on the factor connectivity between its nodes. Several factors can be at the origin of a connectivity rupture such as: lack of energy on a significant node level, infection of a vital node by a malevolent code, a logical or physical failure of a primary node, etc. This rupture can lead in some cases to a reconfiguration of the network by generating a prejudicial overhead or in other cases to a failure of the mission assigned to the network. In this thesis, we propose three approaches relating to the connectivity maintenance to prolong the lifetime of the wireless sensor networks.

Keywords : Connectivity, Coverage, Sensors networks, Failure node.

ملخص

عمر شبكة لاسلكية، بالأخص شبكة أجهزة الاستشعار اللاسلكية تعتمد بقوة على عامل الارتباط بين عقدها. يمكن أن تكون هناك عدة عوامل تسبب فشل الاتصال مثل نقص الطاقة في عقدة مهمة، أو عدوى لعقدة حيوية بالشفرات الخبيثة، أو الفشل المادي أو المنطقي لعقدة أساسية... الخ. هذا الكسر للروابط يمكن أن يؤدي في بعض الحالات إلى إعادة تشكيل الشبكة وبالتالي توليد النفقات الضارة عامة أو في حالات أخرى إلى فشل المهمة المسندة إلى الشبكة. في هذه الأطروحة، اقترحنا ثلاثة نهج للحفاظ على الاتصال لتمديد عمر شبكة الاستشعار اللاسلكية.

الكلمات المفتاحية : ارتباط، تغطية، شبكات الاستشعار، فشل عقدة.

"Quand je suis allé à l'école, ils m'ont demandé ce que je voulais être quand je serais grand. J'ai répondu : heureux. Ils m'ont dit que je n'avais pas compris la question, j'ai répondu qu'ils n'avaient pas compris la vie"

John Lennon

Introduction Générale

LES progrès technologiques actuels ont mené l'apparition des réseaux de petits dispositifs de basse puissance, qui intègrent des capteurs et des déclencheurs avec un traitement à bord et des possibilités de communication sans fil limitées [1]. Aujourd'hui, l'utilisation de solutions basées sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) augmente rapidement [2]. Les réseaux de capteurs sans fil déploient un très grand nombre de petits dispositifs intelligents qui forment des réseaux ad hoc distribués de captage et de gestion de données, qui collectent des informations détaillées sur l'environnement. Dans des scénarios habituels, ces réseaux sont largement déployés dans les zones d'intérêt (comme les terrains inaccessibles ou les lieux à risques) pour la surveillance dans différentes classes d'applications [3, 4]. Considérant le réseau de capteurs sans fil déployé, en général, dans une zone ayant un accès difficile, l'auto-organisation des nœuds capteurs et de l'adaptation à la dynamique de réseau, ainsi que la coopération mutuelle des capteurs sont essentielles. Cela prolonge la durée de vie du réseau et réduit la congestion en évitant les données redondantes [5, 6, 7, 8]. Les communications sans fil jouent un rôle crucial au sein des réseaux informatiques, leur utilité est qu'elles offrent des solutions ouvertes pour fournir de la mobilité ainsi que des services essentiels là où l'installation d'infrastructures n'est pas possible. Ces réseaux sont en plein développement du fait de la flexibilité de leur interface qui offre de la mobilité aux utilisateurs. Cette mobilité est le nouveau mode de communication utilisé. Elle engendre de nouvelles caractéristiques propres à l'environnement mobile : une fréquente déconnexion, un débit de communication modeste, et surtout des sources d'énergie limitées.

Puisque la plupart des dispositifs de basse puissance ont des batteries avec une durée de vie limitée et le remplacement des batteries sur des dizaines de milliers de ces dispositifs est infaisable, alors il est bien approuvable qu'un réseau de capteurs devrait

être déployé avec une forte densité [9] afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Dans un réseau à haute densité avec des capteurs à la contrainte d'énergie, si tous les nœuds capteurs fonctionnent en mode actif alors une quantité excessive d'énergie sera gaspillée, les données de capteurs rassemblées sont susceptibles d'être fortement corrélées et redondantes, et d'ailleurs, la collision excessive de paquets peut se produire en raison des envois simultanés de paquets par les capteurs en présence de certains événements déclencheurs. Par conséquent, il n'est ni nécessaire ni souhaitable que tous les nœuds fonctionnent simultanément en mode actif. L'une des questions qui surgissent dans de tels réseaux à haute densité de capteurs est le contrôle de la densité. Dans [10], les auteurs optent pour le prolongement du temps de fonctionnement du système en gardant, à un instant donnée, seulement un ensemble nécessaire de capteurs en mode actif et mettant le reste des capteurs en mode sommeil. Une autre catégorie d'approches pour le maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil est, évidemment, la restauration de la connectivité après échec d'un nœud capteur [11, 12, 13].

Etant donné un réseau de capteurs sans fil déployé dans une zone dure et difficile d'accès, la durée de vie de ce réseau dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité, entre les nœuds de ce réseau, tels que le manque d'énergie au niveau d'un nœud important, infection d'un nœud vital par un code malveillant, une défaillance logique ou physique d'un nœud primaire etc. La défaillance d'un nœud capteur laisse une partie (ou toute sa zone) sans couverture, et peut engendrer le partitionnement du réseau si c'est un nœud passerelle (un nœud de relais), ce qui veut dire diviser le réseau en deux ou plusieurs sous réseaux où certains nœuds peuvent, également, être déconnectés du réseau global. Ce qui implique une perte de connectivité entre les parties de ce dernier. *Notre objectif, dans ce travail, est le maintien de la connectivité; dans le cas de la perte de connectivité, l'objectif sera la restauration de cette dernière après défaillance d'un nœud capteur en tenant compte de la contrainte d'énergie, en essayant de partager l'énergie totale consommée, pour restaurer la connectivité, par plusieurs nœuds, pour minimiser la consommation d'énergie individuelle.*

Organisation de la thèse

Cette thèse traite le thème "Maintien de la connectivité dans les réseaux Ad hoc sans fil". A cet effet, nous l'avons organisé comme suit :

Après l'introduction générale, le chapitre I introduit les réseaux de capteurs sans fil où nous donnons des notions de base et des généralités sur les réseaux ad hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier.

Le chapitre II est consacré aux travaux antérieurs sur le maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil où nous classifions et étudions les approches proposées dans la littérature.

Dans le chapitre III, nous décrivons notre première contribution au problème du maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil, qui se porte sur la détection et le remplacement à la chaîne d'un nœud capteur défaillant suivant un algorithme de remplacement distribué.

Le chapitre IV est consacré à la deuxième contribution au problème posé, où nous avons proposé une approche de remplacement à la chaîne d'un nœud défaillant pour le maintien de la connectivité entre les nœuds capteurs d'un réseau sans fil, en utilisant une table de voisins à deux sauts.

Dans le chapitre V, après avoir discuté les différents protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, nous proposons une approche de routage en tenant compte du maintien de la connectivité.

Enfin, nous terminerons notre thèse par une conclusion générale, et nous énoncerons des perspectives de recherche.

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX AD HOC ET LES RCSFS

1.1 Introduction

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais sont considérés comme un type particulier de réseaux ad hoc. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de s'auto-organiser, de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome.

Ce chapitre décrit quelques généralités sur les capteurs, les réseaux ad hoc en général et les réseaux de capteurs sans fil en particulier.

1.2 Essor des réseaux de capteurs

Les progrès techniques et technologiques réalisés ces dernières années dans les domaines de la micro-électronique, de la micro-mécanique, et des technologies de communication sans fil ont permis de créer des objets communicants, appelés "nœuds capteurs" ou couramment "capteurs" de plus en plus petits, de plus en plus performants et avec des autonomies énergétiques croissantes, à un coût raisonnable. Ces capteurs sont équipés d'une unité de captage (de mesure), d'une unité de calcul, d'une unité de mémorisation (mémoire) et d'une unité de communication (radio). Pour s'alimenter d'énergie, ces nœuds capteurs sont munis de batteries ou d'un système de récupération d'énergie à partir de l'environnement. En vue de collecter et transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte, des nœuds capteurs sont déployés sur une zone de surveillance pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou "Wireless Sensor Network" (WSN) en anglais. Un point de collecte est appelé *puit*

(ou *sink* en anglais), c'est un nœud particulier doté d'une puissance de calcul supérieure et d'une quantité d'énergie potentiellement infinie. Ce puit peut être connecté à Internet ou possède un lien radio de type GSM ou GPRS qui lui permet d'envoyer des données ou des alertes à un centre de contrôle pour l'utilisateur final (voir la figure 1.1). Il peut y avoir plusieurs puits mobiles ou fixes dans un réseau mais pour des raisons de coût, il y a beaucoup moins de puits que de nœuds capteurs. Un RCSF a de nombreuses perspectives d'application dans des domaines variés, tels que la surveillance industrielle, les opérations militaires, le suivi et la gestion de phénomènes naturels. Ce type d'application implique des contraintes communes à de nombreux réseaux de capteurs. Les capteurs sont déployés sur des zones étendues et potentiellement difficiles d'accès, ils doivent alors s'auto-organiser pour envoyer de proche en proche les messages jusqu'aux puits en utilisant des protocoles de routage. Les nœuds doivent faire en sorte pour économiser leur énergie pour vivre le plus longtemps possible avec leur faible quantité d'énergie, car les nœuds défailants (ou qui n'ont plus d'énergie) ne seront pas remplacés dans tous les cas.

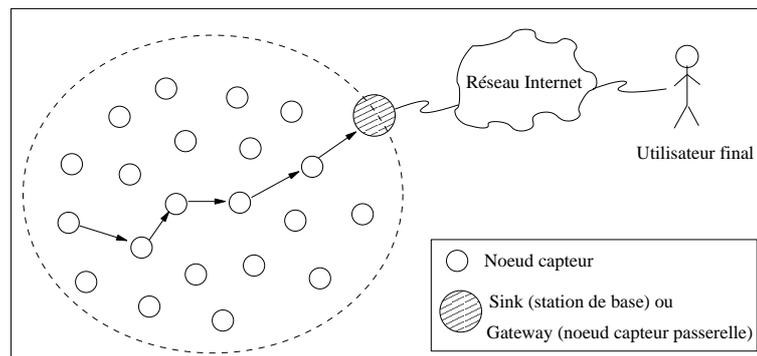


FIG. 1.1 – Réseau de capteurs sans fil

1.3 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil (*wireless network* en anglais) est un réseau informatique qui connecte différents hôtes ou nœuds par des ondes radios. Les réseaux sans fil constituent avant tout une alternative aux réseaux câblés. Leur compatibilité avec les réseaux câblés permet également de les ajouter comme extension. C'est une technique qui permet aux particuliers, aux réseaux de télécommunications et aux entreprises de limiter l'utilisation de câbles entre diverses localisations. Dans cette section, nous définissons

les réseaux sans fil ad hoc, et un cas particulier de ces derniers qui sont les réseaux de capteurs sans fil.

1.3.1 Réseaux ad hoc

Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil qui leurs éléments les constituant (généralement appelés hôtes ou nœuds) communiquent entre eux en mode pair-à-pair et sont capables de s'auto-organiser sans infrastructure définie préalablement et sans la disponibilité d'aucune administration centralisée. Par exemple connecter un équipement à un autre équipement sans l'utilisation d'infrastructure (comme par exemple un point d'accès dans les réseaux sans fil ou un routeur dans les réseaux câblés). Les réseaux ad hoc, dont leur configuration est mobile, sont connus sous le nom de "réseaux mobiles ad hoc" ou MANETs (*Mobile ad hoc networks* en anglais). Dans un réseau ad hoc, un nœud peut communiquer directement avec les nœuds qui sont dans son rayon de communication (on les appelle les voisins directs). Pour communiquer avec d'autres nœuds non voisins directs (ceux qui sont en dehors du rayon de communication), un protocole de routage est nécessaire pour construire des routes entre les nœuds afin d'acheminer les données du nœud source vers le nœud destination. En d'autres termes, chaque composant du réseau agit en tant que terminal et nœud de relais, et participe au maintien de la connectivité dans le réseau tout entier [14].

1.3.2 Réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Les réseaux de capteurs sans fil, dans la dernière décennie, ont attiré un grand nombre de chercheurs et d'industriels pour leur intérêt, et ont apporté des solutions dans un grand nombre d'applications. Nous donnons dans ce qui suit la définition d'un nœud capteur, ses composants, la définition d'un réseau de capteur sans fil, ses objectifs et ses applications.

1.3.2.1 Définition d'un nœud capteur

Un capteur est un petit dispositif électronique équipé d'une source d'énergie limitée [3]. Les capteurs peuvent être placés ou semés dans une zone d'intérêt pour la surveiller, formant ainsi un réseau de capteurs. Les dispositifs de détection sont conçus pour être capables de former un réseau sans fil autonome, pouvant détecter des données et de les délivrer à un ensemble spécifié de destinations [15]. En d'autres

termes, les capteurs sont de petits appareils dotés de mécanismes leur permettant de relever des informations sur leur environnement et de les communiquer à la station de base. Autrement dit, les nœuds peuvent détecter les changements environnementaux (température, humidité, pression, etc.) et les signaler à un centre de contrôle via une station de base. Les nœuds capteurs se voient très utiles pour un déploiement dans des environnements hostiles ou dans des grandes zones géographiques. La surveillance des zones est une application courante des réseaux de capteurs.

1.3.2.2 Composants d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base [3], représentées dans la figure 1.2 et qui sont :

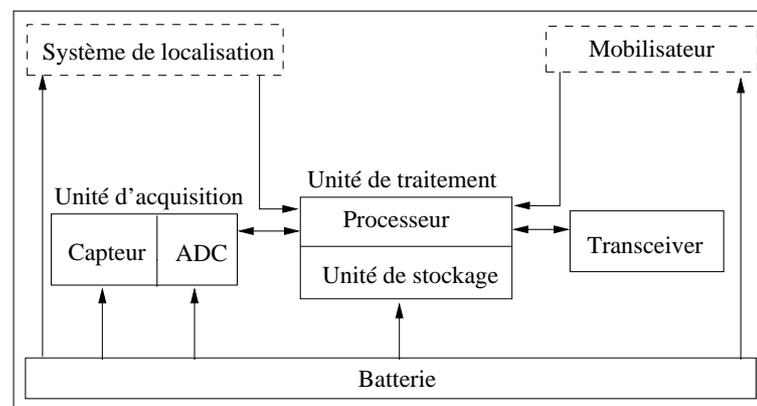


FIG. 1.2 – Composants d'un nœud capteur

Unité d'acquisition (ou de captage) : elle est généralement composée de deux sous-unités, un capteur et un convertisseur analogique-numérique ADC (Analog-to-Digital Converter). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques. Ces derniers alimenteront l'unité de traitement.

Unité de traitement : elle est généralement composée d'une petite unité de stockage pour stocker les données collectées, et d'un processeur pour traiter les données et contrôler les procédures permettant au nœud capteur de collaborer avec d'autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition.

Unité de communication (émetteur-récepteur ou transceiver en anglais) : elle est composée d'un émetteur/récepteur. C'est l'unité permettant aux nœuds du réseau de communiquer entre eux via un support de communication radio.

Batterie : c'est l'un des composants importants d'un nœud capteur, elle sert à alimenter les autres unités pour fonctionner. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de la conception des protocoles pour les réseaux de capteurs. Et les batteries ne sont, généralement, ni rechargeables ni remplaçables.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres sous unités ou composants additionnels, dépendant des applications, tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) exigés par les techniques de routage dans le réseau de capteurs et les tâches de captage. Un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un nœud capteur quand on l'exige pour effectuer les tâches assignées. Toutes ces sous unités peuvent être rassemblées dans un seul module (ou boîte) [16, 3]. La taille exigée peut être moins d'un centimètre cube [17, 3], qui est assez léger pour demeurer suspendu dans l'air. En plus de la taille, il y a quelques autres contraintes sur les nœuds capteurs, ces nœuds doivent [18] consommer moins d'énergie, fonctionner dans des densités volumétriques élevées, avoir un coût de production moins élevé, être dispensables et autonomes, fonctionner sans surveillance, et s'adapter à l'environnement.

1.3.2.3 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensor Network (WSN) est un réseau informatique composé de petits dispositifs autonomes, fixés ou dispersés aléatoirement dans une zone d'intérêt [15], utilisant des capteurs coopérant pour surveiller des conditions environnementales ou physiques, comme la température, le son, les vibrations, la pression, le mouvement, etc. [19]. Pour les applications environnementales, les données recensées permettent une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. Mais l'information fournie par le réseau est beaucoup plus utile s'il est possible de déterminer dans quelle partie de la zone surveillée cette information a été recensée. Supposons qu'un réseau de capteurs est déployé pour surveiller une forêt (détecter le feu en mesurant la température de l'air), des résultats utiles de ce réseau seraient non seulement le signal que la température de l'air est très élevé, mais

également dans quelle partie de la forêt surveillée le feu a commencé, pour permettre de combattre le feu plus efficacement. Puisque les réseaux de capteurs sans fil peuvent être déployés dans des terrains inaccessibles, la position des nœuds capteurs ne peut être prédéterminée. En conséquence, un système de localisation est requis afin de fournir des informations de position aux nœuds. Parfois, la localisation de nœuds capteurs est indispensable dans l'observation d'événements, ou la poursuite d'objets. Parmi les domaines d'application on trouve le domaine de la santé, le domaine militaire, et le domaine de la sécurité. Par exemple, les données physiologiques d'un patient peuvent être contrôlées à distance par un médecin, comme l'illustre la figure 1.3 [20]. Bien que cela soit plus avantageux pour le patient, il permet également au médecin de mieux comprendre l'état actuel du patient. Les réseaux de capteurs peuvent également être utilisés pour détecter des agents chimiques étrangers dans l'air et l'eau. Ils peuvent aider à identifier le type, la concentration et l'emplacement des polluants. Nous pouvons dire qu'à l'avenir, les réseaux de capteurs sans fil seront une partie intégrante de notre vie, d'autant plus que les ordinateurs personnels d'aujourd'hui [3].

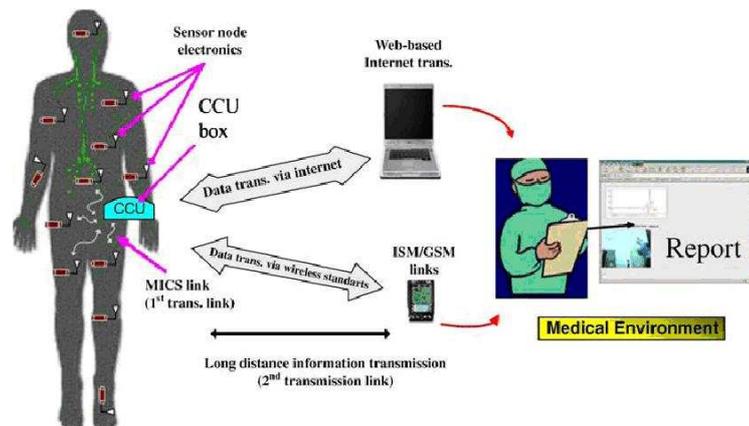


FIG. 1.3 – Réseau de capteurs dans le domaine médical

1.3.2.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

Les applications des WSN devraient supporter la mise en œuvre et le fonctionnement de base d'un réseau de capteurs tout en tenant compte de certaines des caractéristiques suivantes :

- Les nœuds capteurs sont des dispositifs de petite taille (avec des volumes approchant un millimètre cube dans un proche avenir [21]).

- Les capteurs sont limités en termes de quantité d'énergie stockée et/ou récoltée à partir de l'environnement. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs. Toutes les applications des WSNs : le routage [22, 23], le maintien de la connectivité [12, 24, 25, 26], etc. utilisent des techniques pour assurer une conservation et une bonne gestion d'énergie, car cette dernière influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs et donc sur le réseau global.
- Les capteurs sont susceptibles de tomber en panne, suite à l'épuisement de leurs batteries ou à des influences environnementales. Ainsi, l'auto-configuration des nœuds capteurs et le développement des protocoles de détection et de remplacement des nœuds défaillants aident à prolonger la durée de vie du réseau.
- Les capteurs ont des ressources limitées : la performance du processeur, la capacité mémoire, la largeur de bande et la portée de la communication sans fil.

La mobilité des nœuds, les défaillances de nœuds, et les obstacles environnementaux causent de fréquents changements de topologie de réseau. Les défaillances de communication sont également un problème répandu dans les réseaux de capteurs sans fil. Un autre problème est l'hétérogénéité, car le réseau peut se composer d'un grand nombre de nœuds différents en termes de capteurs, de puissance de calcul, et de mémoire. D'une part, ce nombre élevé de nœuds soulève des questions d'évolutivité, d'autre part, il fournit un niveau élevé de redondance. Les nœuds doivent également pouvoir fonctionner en mode sans surveillance puisqu'il est impossible d'entretenir un grand nombre de nœuds dans des endroits éloignés ou inaccessibles.

1.3.2.5 Objectif de base des RCSFs

A partir des applications des réseaux de capteurs sans fil, nous pouvons tirer leurs objectifs de base. Ces derniers peuvent être rassemblés dans les points suivants :

- Déterminer les valeurs de quelques paramètres suivant une situation donnée. Par exemple, dans un réseau environnemental, on peut chercher à connaître la température, la pression atmosphérique, la quantité de la lumière du soleil, l'humidité relative dans un certain nombre de sites, etc.
- Détecter l'occurrence des événements dont on est intéressé et estimer les paramètres des événements détectés. Dans les réseaux de contrôle de trafic, on peut

vouloir détecter le mouvement de véhicules à travers une intersection et estimer la vitesse et la direction du véhicule.

- Classifier l'objet détecté. Par exemple dans un réseau de trafic, on peut dire si un véhicule est une voiture, un bus, ou autre.

1.3.3 Comparaison réseaux de capteurs et réseaux ad hoc

Les caractéristiques des réseaux de capteurs leur assurent une large gamme d'applications. La réalisation de ces dernières nécessite des techniques de réseau ad hoc sans fil. Bien que de nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés pour les réseaux classiques ad hoc sans fil, ces derniers ne sont pas bien adaptés pour les caractéristiques et les exigences d'application des réseaux de capteurs. Pour clarifier ce point, nous illustrons ci-dessous les principales différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc :

- Les nœuds d'un réseau ad hoc classique sont souvent utilisées directement par des personnes (par exemple : les portables, les PDA, etc.). Dans les RCSFs, les nœuds capteurs interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement et/ou entre eux.
- Les nœuds capteurs sont déployés avec une grande densité, et leur nombre peut être plus élevé que le nombre de nœuds dans un réseau ad hoc.
- Le fait que les nœuds capteurs dans un RCSF sont souvent déployés dans des environnements hostiles (par exemple forêt, volcan, terrain accidenté, etc.), les rend vulnérables et risquent de tomber en panne beaucoup plus souvent que les nœuds dans un réseau ad hoc classique.
- La topologie d'un réseau de capteurs change très fréquemment du fait des pannes des nœuds ou de leur mobilité.
- Le flot de données dans les réseaux de capteurs est "Many-to-one" : Dans la plupart des cas, les données sont collectées par plusieurs nœuds capteurs et envoyées à une seule station de base (appelée aussi *sink*) ou à une passerelle. Dans les réseaux ad hoc le flot de données est "Any-to-any".
- Les nœuds capteurs sont limités en puissance, capacités de calcul et de mémoire.
- Les nœuds capteurs peuvent ne pas avoir d'identification globale (ID) en raison de leur nombre élevé. Mais dans les réseaux ad hoc il y'a toujours la notion d'ID.
- Dans un réseau de capteurs, les nœuds collaborent pour remplir un objectif, par

contre dans les réseaux ad hoc chaque nœud a son propre objectif.

- Dans les réseaux de capteurs l'énergie est un facteur déterminant, et dans les réseaux ad hoc le débit est majeur.

1.4 Architecture de communication d'un RCSF

Un réseau de capteurs est généralement constitué de nombreux nœuds répartis dans une zone géographique (appelée zone de couverture). Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs stations de base appelées *puits* (ou *sink* en anglais). Le *sink* collecte les données recensées par les nœuds capteurs dispersés dans la zone de couverture, et les communique vers le nœud gestionnaire de tâches via d'autres réseaux (Internet ou satellite). L'utilisateur peut alors accéder à distance à ce nœud gestionnaire de tâches pour récupérer les données recensées. Cette architecture [3] est illustrée dans la figure 1.4.

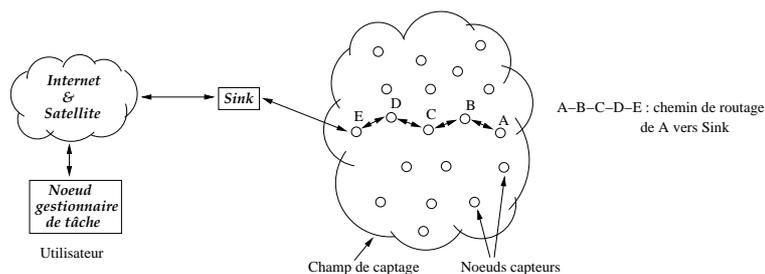


FIG. 1.4 – Architecture de communication d'un RCSF

1.5 Pile protocolaire dans un RCSF

Un RCSF est une série de connexions entre les capteurs leur permettant de communiquer. Le contenu, la portée, la taille, la vitesse et la fiabilité du réseau dépend d'un ensemble de protocoles et de leur implémentation. Les protocoles sont un moyen de communication prédéterminé. Conceptuellement, il est utile de représenter l'ensemble de ces protocoles sous forme d'une pile, c'est ce qu'on appelle la pile protocolaire. La pile protocolaire [3] utilisée par la station de base, ainsi que tous les autres capteurs du réseau, est illustrée dans la figure 1.5. Elle comprend la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données, la couche physique, le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches.

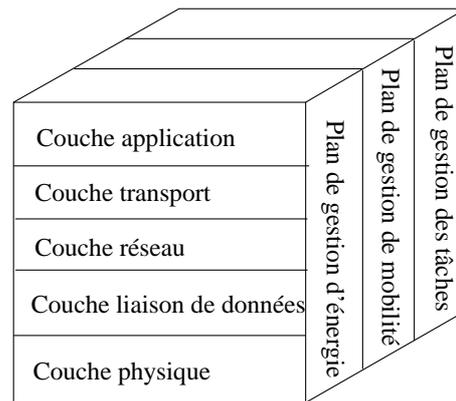


FIG. 1.5 – Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil

- La couche application : suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur cette couche.
- La couche transport : elle sert à maintenir le flux de données en cas de nécessité dans les applications utilisées, particulièrement lors d'une connexion avec Internet.
- La couche réseau : elle s'occupe du routage des données fournies par la couche transport.
- La couche liaison de données : comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche MAC doit garantir une faible consommation d'énergie et un taux de collision minime entre les données diffusées par les nœuds voisins.
- La couche physique : elle s'occupe des techniques d'émission, de réception, de modulation et d'encryptage de données.
- Les niveaux de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches sont responsables du contrôle de l'énergie consommée, des mouvements des nœuds et de la distribution des tâches à travers toute la pile protocolaire, ces niveaux permettent aux capteurs de coordonner leurs tâches et minimiser la consommation d'énergie.

1.6 Applications des RCSFs

Les RCSFs est une nouvelle technologie, qui est actuellement largement répandue dans plusieurs domaines variés ; ses applications accroissent chaque jour. Harnando et al. [21] les décomposent en quatre catégories, représentées dans la figure 1.6 et qui sont :

les applications environnementales, les applications dans la santé, les applications dans la sécurité, et autres applications additionnelles.

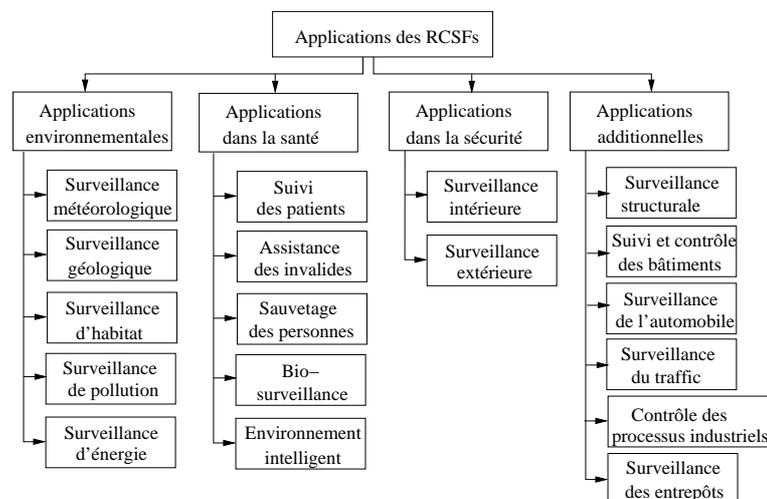


FIG. 1.6 – Applications des RCSFs

1.6.1 Applications environnementales

Les problèmes environnementaux tels que les inondations, les incendies, la pollution, etc. sont de nos jours fréquents. L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans les applications environnementales devient de plus en plus importante, permettant ainsi d'améliorer la connaissance de l'environnement et l'efficacité des moyens de lutte. Les RCSFs peuvent contribuer au développement des systèmes de réponse aux risques, de détection de catastrophes naturelles, de gestion d'énergie, et d'autres systèmes. Les applications environnementales peuvent être décomposées en cinq classes, représentées dans la figure 1.6 et qui sont :

Les applications météorologiques : l'objectif principal de la surveillance météorologique est de contrôler, superviser et étudier diverses grandeurs physiques et atmosphériques. L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans ce domaine serait d'un grand apport pour réduire ou prévenir les catastrophes à temps, telles que les ouragans, les inondations et les sécheresses, qui ont déjà été la cause de grandes pertes économiques et humaines [27]. Les avantages de cette technologie dans la prévision des catastrophes sont la collecte de données en temps réel, la réponse précise et coordonnée de plusieurs capteurs, et la surveillance d'une zone

géographique importante, car les nœuds capteurs peuvent être déployés avec une grande densité.

Les applications géologiques : l'une des applications les plus importantes dans le domaine de la géologie est la prévision des catastrophes. La principale caractéristique partagée par les catastrophes géologiques, telles que les tremblements de terre, les tsunamis, les éruptions volcaniques, et les glissements de terrains, est le fait qu'elles sont liées à un événement souterrain. Contrairement aux méthodes existantes de surveillance des événements souterrains, qui s'appuient sur des capteurs enterrés reliés par fil à la surface, les composants du RCSF sont déployés complètement souterrain et ne nécessitent pas de connexions filaires [21].

Surveillance des habitats : la biodiversité dans l'environnement de la faune et la flore est menacée par la progression des dégradations d'habitats naturels, ainsi la surveillance de ces derniers devient de plus en plus exigeante en terme de temps et de précision pour évaluer les effets de toute action de conservation. L'utilisation de la nouvelle technologie de réseau de capteurs sans fil, comme solution pour la surveillance de l'habit, montre d'énormes avantages potentiels pour les communautés industrielles et scientifiques, et la société dans son ensemble, en raison de leur capacité de collecter des données à long terme à des échelles et résolutions qui sont difficiles à obtenir autrement par les méthodes traditionnelles. Les chercheurs sont de plus en plus préoccupés par l'impact potentiel de la présence humaine lors de la surveillance des plantes et des animaux dans leur milieu, mais avec des capteurs sans fil, la surveillance de la faune peut être effectuée sans l'utilisation d'instruments traditionnels intrusifs [28].

Surveillance de la pollution : une préoccupation majeure du 21ème siècle est l'augmentation de la pollution et de ses effets dévastateurs. La pollution dans toutes ses formes doit être contrôlée et surveillée pour réduire ses conséquences néfastes. Les RCSFs peuvent remplacer les systèmes classiques surveillant la pollution, qui utilisent les câbles, et soient plus efficaces car ils peuvent être déployés n'importe où, même dans des zones durs et difficiles d'accès.

Surveillance de l'énergie : il est souvent possible d'économiser de l'énergie, qui est une ressource très chère, en intégrant la nouvelle technologie et les nouvelles techniques de gestion. L'avantage d'utiliser la technologie sans fil est que le gaspillage d'énergie peut souvent être réduit par quelque chose d'aussi simple que

la mesure de la température ou de la présence humaine dans une pièce et de prendre les mesures nécessaires, telles que la coupure d'une lumière ou la baisse du chauffage.

1.6.2 Applications médicales

La technologie des RCSFs est utilisée dans les applications de soins sanitaires, telles que le traitement médical, la surveillance des patients pré- et post-hospitaliers, le sauvetage des personnes, etc. En outre, les réseaux de capteurs peuvent contribuer à résoudre certains problèmes sociaux importants, tels que le gardiennage des malades chroniques, des personnes âgées, et des personnes handicapées mentales et physiques. Le domaine des soins sanitaires est divisé en cinq catégories distinctes [21], et qui sont :

Suivi des patients : le but principal de la surveillance d'un patient est d'observer son état de santé dans l'environnement familial et/ou hospitalier. Un scénario d'application dans ce domaine est de doter un patient de petits capteurs sans fil, permettant aux médecins et aux infirmiers de surveiller sans interruption son état, pour réagir aux changements [29, 30].

Assistance des invalides : l'assistance aux personnes invalides (ou handicapées) considère les scénarios d'application où des capteurs intelligents opèrent dans le corps humain, pour lutter contre les faiblesses d'organes ou de surveiller les paramètres physiologiques importants ou la viabilité d'un organe particulier. Voir comme exemples les travaux de Yuce et al. [20, 31].

Sauvetage des personnes : les patients dans le lieu de la catastrophe peuvent bénéficier des technologies qui surveillent en permanence leur statut vital, et suivent leurs déplacements jusqu'à ce qu'ils soient admis à l'hôpital. Gao et al. [32] ont conçu et développé un système de surveillance des patients en temps réel qui intègre des capteurs de signes vitaux, des capteurs de position, un réseau ad hoc, des dossiers électroniques des patients, et des technologies Web pour permettre le contrôle à distance de l'état des patients.

Bio-surveillance : la bio-surveillance permet de surveiller, par exemples, la qualité du sol, la qualité de l'eau, ou la qualité de l'air par des capteurs physico-chimiques, qui mesurent en continu les concentrations des différents polluants

atmosphériques pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement, et pour en suivre l'évolution.

Environnement intelligent : la technologie de capteur intelligent peut aider à résoudre certains problèmes sociaux importants, tels que le gardiennage pour les malades chroniques, les personnes âgées et les personnes handicapées mentales et physiques [21].

1.6.3 Applications de la sécurité

Certaines institutions peuvent être suivies en temps réel par des réseaux de capteurs sans fil pour prévenir d'éventuel vols ou incendie. Un autre exemple est les applications envisagées des réseaux de capteurs pour la surveillance de routes ou de voies ferrées pour prévenir des accidents.

1.6.4 Autres applications additionnelles

D'autres applications de RCSFs peuvent être citées à savoir [21] : la surveillance structurale, le suivi et le contrôle de construction, la surveillance automobile, la surveillance du trafic, le contrôle des processus industriels, et la surveillance des entrepôts.

1.7 Standards des réseaux Ad hoc

La standardisation est une solution au problème d'interopérabilité dans les nouvelles technologies, permettant ainsi de créer une base commune de travail pour tout intervenant dans le domaine, afin de pouvoir produire du matériel et du logiciel compatibles et interopérables. Nous citons dans ce qui suit quelques standards.

1.7.1 IEEE 802.15.1

Bluetooth, connu sous la norme IEEE 802.15.1 [33] est basé sur un système de radio sans fil conçu pour les appareils à courte portée, et les appareils à bas prix pour remplacer les câbles des périphériques informatiques comme les souris, claviers, manettes de jeu, et les imprimantes. Cette gamme d'applications est connue sous le nom de réseau personnel sans fil (WPAN : Wireless Personal Area Network). Deux topologies de connectivité sont définis dans Bluetooth : le piconet et le scatternet. Un

piconet est un WPAN formé par un périphérique Bluetooth servant de maître dans le piconet et un ou plusieurs périphériques Bluetooth agissant comme esclaves. Tous les appareils participant à la communication dans un piconet donné sont synchronisés en utilisant l'horloge du maître. Les esclaves ne communiquent qu'avec leur maître en mode point-à-point, sous le contrôle du maître. Les transmissions du maître peuvent être soit point-à-point ou point-à-multipoint. Un scatternet est un groupe de piconets Bluetooth opérationnels qui se chevauchent dans le temps et l'espace. Deux piconets peuvent être connectés pour former un scatternet. Un composant Bluetooth peut participer à plusieurs piconets en même temps, permettant ainsi la possibilité de circuler l'information au-delà de la zone de couverture d'un piconet. Un composant dans un scatternet pourrait être un esclave dans plusieurs piconets, mais maître dans un seul d'entre eux [34].

1.7.2 IEEE 802.15.3

IEEE 802.15.3 est conçu pour fournir des services multimédia de haute qualité à la maison. L'allocation dynamique de bande passante pour une connexion multimédia devrait être considérée afin de parvenir à une plus grande utilisation du canal et moins de retard, en particulier pour des connexions multimédia à débit binaire variable (VBR) [35]. Il permet une faible complexité, à un faible coût, faible consommation d'énergie et haut débit de données pour une connectivité sans fil entre les périphériques au sein des réseaux personnels sans fil (WPAN). Un piconet est la topologie de base de WPAN et se définit comme une collection d'un ou de plusieurs composants qui partagent un seul coordonnateur de piconet (PNC). Une des fonctionnalités d'un PNC est de planifier le trafic d'un piconet [36].

1.7.3 IEEE 802.15.4

Le 802.15.4 est un protocole de communication défini par l'IEEE, et qui est destiné aux réseaux sans fil de la famille des LR WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network) du fait de leur faible consommation d'énergie, leur faible portée et du faible débit des nœuds utilisant ce protocole. Car le principal but n'étant plus d'atteindre des débits toujours plus élevés mais de maximiser la durée de vie des réseaux.

Le standard 802.15.4 est utilisé par de nombreuses implémentations basées sur des protocoles propriétaires ou sur IP (Internet Protocol), comme le ZigBee et le 6LoWPAN (IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks [37]). Ce dernier est la définition d'un protocole permettant aux paquets IPv6 d'être acheminés sur des réseaux sans fil de faible puissance. Le concept est né de l'idée que l'Internet Protocol pourrait et devrait être appliqué à des petits composants.

L'IEEE a défini deux types de composants pouvant participer à un réseau [38] :

- le composant ayant toutes les fonctions possibles (FFD : Full Function Device),
- le composant ayant des fonctions limitées (RFD : Reduced Function Device).

Le FFD peut communiquer avec des FFD et des RFD, et peut ainsi jouer le rôle de coordinateur de PAN, de routeur (coordinateur) ou de simple périphérique (capteur, interrupteur).

Le RFD est un nœud final utilisé dans des contextes simples comme les interrupteurs ou de simples capteurs. Ces nœuds ne peuvent communiquer qu'avec des FFD (coordinateurs) et ne peuvent participer au routage dans le réseau. Ils ne sont ainsi que des nœuds terminaux dans le réseau avec des ressources moindres en comparaison avec des FFD.

1.7.4 Alliance ZigBee

L'alliance Zigbee est formée par un consortium d'entreprises pour répondre aux besoins spécifiques du marché des entreprises et des consommateurs. Cette alliance a proposé un standard propriétaire offrant des fonctionnalités de la couche réseau à la couche applicative. Le standard ZigBee repose sur les couches basses du standard IEEE 802.15.4. Zigbee a été développé spécialement pour les appareils sans fil assurant une faible consommation d'énergie et une longue durée de vie. Un composant ZigBee peut prendre quelques millisecondes seulement pour quitter son état de sommeil par rapport aux composants Bluetooth ou WiFi [39].

ZigBee définit trois classes de composants : Coordonnateurs ZigBee (ZC¹), routeurs ZigBee (ZR²), et les composants d'extrémité ZigBee (ZED³). Chaque réseau a un seul ZC, qui est responsable de la formation du réseau et qui peut aussi faciliter le routage de messages. Les ZR participent au routage et peuvent également capter ou déclencher une application. Les ZED exécutent seulement les applications et ne peuvent pas participer au routage de messages. Chaque ZED doit faire un rapport à un ZR ou à un ZC.

1.7.5 IEEE 1451

Les objectifs du projet IEEE 1451, standard pour l'interface transducteur intelligent pour les capteurs et les déclencheurs (ou actionneurs), consistent à définir un ensemble d'interfaces de communication communes pour la connectivité des transducteurs aux systèmes à base de microprocesseurs, aux instruments, et aux réseaux de contrôle. Un transducteur peut être soit un capteur ou un déclencheur. Un capteur est un transducteur qui génère un signal électrique proportionnel à un paramètre physique, biologique ou chimique. Un déclencheur est un transducteur qui accepte un signal électrique et prend une action physique. Un transducteur intelligent est l'intégration d'un capteur analogique ou numérique, ou d'un composant déclencheur, d'une unité de traitement, et d'une interface de communication [40].

Le projet IEEE 1451 consiste à développer des méthodes de connectivité matérielles et logicielles standards pour les transducteurs intelligents, pour contrôler l'utilisation des technologies réseaux de contrôle existantes. Il n'y a aucun ensemble de conditions pour l'usage de différents convertisseurs analogique/numérique, des microprocesseurs, des protocoles réseaux, et des émetteurs récepteurs. Cela permettra aux industries de réduire l'effort de développer et émigrer les transducteurs intelligents aux réseaux. Les objectifs ultimes de ces standards sont de fournir les moyens pour parvenir à des capteurs à l'interchangeabilité et à l'interopérabilité réseaux [41].

¹ZigBee Coordinator

²ZigBee Router

³ZigBee End Device

1.8 Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit :

1.8.1 Tolérance aux pannes

Les nœuds capteurs constituant un RCSF sont toujours exposés aux pannes et aux blocages. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une panne d'un nœud capteur, tels que le manque d'énergie au niveau de sa batterie, infection par un code malveillant, une interférence environnementale, une défaillance logique ou physique, etc. La panne d'un nœud capteur ne doit pas affecter le fonctionnement global de son réseau. C'est le problème de fiabilité ou de tolérance aux pannes. La tolérance aux pannes est donc la capacité de maintenir le fonctionnement du réseau sans interruption après une panne d'un ou de plusieurs nœuds capteurs. On dit que la tolérance aux pannes est meilleure lorsque le nombre de nœuds en panne est grand et que le réseau maintient toujours son bon fonctionnement.

1.8.2 Passage à l'échelle (Scalabilité)

Le nombre de nœuds capteurs déployés dans un RCSF peut être en centaines ou en milliers. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à atteindre des millions. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre important de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs [3].

1.8.3 Système d'exploitation

Les systèmes d'exploitation pour capteurs en réseau sont spécifiquement conçus pour optimiser l'usage des ressources matérielles limitées dont ils disposent : une mémoire avec une petite capacité, un processeur de faible vitesse de traitement et une ressource énergétique très limitée. De nombreux systèmes d'exploitation spécialisés existent, parmi lesquels [42] : TinyOS, ContikiOS, MantisOS, Nano-RK, LiteOS.

1.8.4 Sécurité limitée

Les réseaux Ad hoc en général et les réseaux de capteurs en particulier, sont basés sur des communications sans fil, ce qu'il les rend plus sensibles aux attaques qui menacent les données transmises. Autrement dit, ils sont les plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Les techniques conventionnelles utilisées pour faire face à ces attaques ne sont pas applicables dans les réseaux de capteurs à cause des limitations de ressources, connues dans les éléments constituant ce type de réseau, comme par exemples : la puissance de calcul et la capacité mémoire. L'absence de sécurité dans les réseaux de capteurs augmente le risque des pannes de ce type de réseaux.

1.8.5 Coût de production

Vu le nombre important de nœuds composant un RCSF, le coût de production d'un seul nœud capteur est très important pour évaluer le coût global du réseau. Si le coût de déploiement de ce réseau est supérieur à celui d'un réseau composé de capteurs traditionnels, alors l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas rentable en terme de coût. En conséquence, le coût de chaque nœud capteur doit être le plus bas possible, et réduire le coût de production jusqu'à moins de 1 \$ par nœud capteur est un objectif important pour la faisabilité de la solution RCSF [3].

1.8.6 Environnement

Les nœuds capteurs sont densément déployés dans des endroits parfois durs et difficiles d'accès, tels que les volcans actifs et dangereux pour surveiller leur activité, les champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur d'une grande machine, au fond d'un océan, à l'intérieur d'une tornade, dans des champs biologiquement ou chimiquement contaminés, etc. Ces exemples d'application de RCSF nous donnent l'idée de quoi peut subir les nœuds capteurs. Pour cela, ces derniers doivent être conçus d'une manière à pouvoir résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement, telles que les fortes chaleurs, les pluies, l'humidité, les forts bruits, etc. Ces nœuds doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.

1.8.7 Topologie du réseau

La topologie des réseaux de capteurs est dynamique, elle peut changer au cours du temps du fait que les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements durs et difficile d'accès, où les défaillances de nœuds sont très probables, et qu'un nœud capteur peut devenir aussi non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie, ou mobile (attaché à un objet mobile par exemple) se déplaçant de façon libre et arbitraire, ce qui rend la topologie du réseau fréquemment changeante. Les topologies applicables aux réseaux de capteurs sans fil sont : la topologie en étoile, la topologie en toile ou en grille, et la topologie hybride.

Dans la topologie en étoile, une station de base peut envoyer et recevoir des messages par un certain nombre de nœuds. Ces derniers peuvent seulement envoyer ou recevoir des messages de l'unique station de base, il ne leur est pas permis d'échanger des messages entre eux. En plus de la simplicité de la topologie, les nœuds consomment moins d'énergie et la communication entre ceux-ci et la station de base est à faible latence. L'inconvénient de cette topologie est que la station de base est vulnérable, car elle gère le trafic de tout le réseau.

La topologie en toile est une topologie à communication multi-sauts, tous les nœuds peuvent s'échanger des messages directement s'ils sont à portée de communication. Les nœuds qui ne sont pas à portée de communication peuvent aussi communiquer en utilisant des nœuds intermédiaires, qui jouent le rôle de routeurs. L'avantage de cette topologie est la possibilité de passer à l'échelle du réseau, avec redondance et tolérance aux pannes. En contre partie, la consommation d'énergie peut être plus importante due à la communication multi-sauts, qui crée aussi une certaine latence.

Enfin, la topologie hybride résulte des deux topologies, en étoile et en toile. Elle fournit des communications réseau robustes et diverses, en assurant la minimisation de la consommation d'énergie.

1.8.8 Contraintes matérielles

Les contraintes matérielles liées aux RCSFs sont surtout dues à la miniaturisation des capteurs, qui est un avantage pour faciliter le déploiement du réseau, parmi ces

contraintes : la puissance des batteries, utilisées pour alimenter les nœuds capteurs, est limitée à cause de leur taille réduite. Pour cela, les capteurs doivent minimiser leur consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau global. Les processeurs des nœuds capteurs sont différents de ceux d'une machine classique, car ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faibles fréquences et leur puissance de calcul est faible. Les capteurs doivent être conçus de manière à s'adapter aux différents environnements (chaleurs, humidité, etc.), ils doivent être autonomes et très résistants, vu qu'ils sont souvent déployés dans des environnements durs et difficiles d'accès. Les nœuds capteurs sans fil sont déployés de manière aléatoire et fonctionnent de façon autonome. Pour cela, la plupart de leurs opérations de captage et de leurs algorithmes de routage requièrent la connaissance de la localisation des nœuds avec une grande précision. Donc un système de localisation pour un capteur est nécessaire. C'est la raison pour laquelle souvent ces nœuds possèdent un système de localisation GPS, bien qu'il ait été montré que cette solution n'est pas fiable pour les réseaux de capteurs sans fil. Savvides et al dans [43] proposent une autre approche qui consiste à équiper un nombre limité de nœuds capteurs avec le système GPS, et les autres nœuds estiment leurs positions par rapport à ces derniers via un algorithme distribué. Un système de mobilité peut parfois être nécessaire, pour qu'un nœud capteur se déplace lorsque cela est nécessaire, pour mener à bien les tâches assignées ou remplacer par exemple un nœud défaillant [12, 26]. Toutes ces unités peuvent être intégrées dans un petit boîtier qui peut être inférieure à un centimètre cube, avec un poids très léger permettant aux nœuds de rester suspendus dans l'air [3].

1.8.9 Média de transmission

Beaucoup de matériels pour les nœuds capteurs sont basés sur le modèle de circuit RF (Radio Frequency) [3]. Le nœud capteur sans fil μ AMPS (micro-Adaptive Multi-domain Power-aware Sensors) [9] utilise un émetteur-récepteur compatible Bluetooth 2,4 GHz avec un synthétiseur de fréquence intégré. Le composant capteur de faible puissance, décrit dans [44], utilise un seul canal émetteur-récepteur RF et fonctionne à 916 MHz. L'architecture WINS (Wireless integrated network sensors) [17] utilise également des liaisons radios pour la communication. Un autre mode de transmission possible pour la communication inter-nœuds dans les réseaux de capteurs est l'infrarouge. La communication infrarouge est robuste aux interférences des appareils

électriques. Les émetteurs-récepteurs basés sur l'infrarouge sont moins chers et plus faciles à réaliser. La plupart des ordinateurs, les PDAs et les téléphones mobiles actuels offrent une interface de liaison de données infrarouge. Cependant, le principal inconvénient est l'exigence d'une ligne de vision entre l'émetteur et le récepteur. Ceci fait que l'infrarouge est un choix difficile pour la transmission dans les scénarios de réseaux de capteurs [3].

1.8.10 Connectivité

Un réseau est dit connecté si chaque nœud peut communiquer avec n'importe quel autre nœud du réseau, directement ou en utilisant des nœuds intermédiaires (communication multi-sauts). Il est parfois utile d'envisager des formes plus puissantes de connectivité, comme la k -connectivité. Un réseau est dit k -connecté, s'il y a au moins k chemins disjoints entre deux nœuds quelconques, un tel réseau reste connecté, même si $k-1$ nœuds tombent en panne. Un réseau k -connecté ($k \geq 2$) présente une meilleure tolérance aux pannes qu'un réseau 1-connecté. La k -connectivité permet de prolonger la durée de vie du réseau en cas de défaillance de nœuds [45]. La connectivité est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance de nœuds, les attaques, etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, etc. La 1-connectivité est une condition fondamentale pour que le réseau soit opérationnel.

1.8.11 Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs sans fil sont des composants microélectroniques, il ne peuvent être équipés que par une source d'énergie limitée (<0.5 Ah, 1.2 V) [3]. Dans la plupart des cas, ces nœuds capteurs ne peuvent être rechargés. Par conséquent, leur durée de vie dépend fortement de la durée de vie de leurs batteries. Pour cela, les nœuds capteurs doivent bien gérer leur consommation d'énergie. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud collecte des données et les transmet à la station de base, et joue également le rôle d'un routeur. Le dysfonctionnement de quelques nœuds entraîne un changement significatif de la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage des paquets et une réorganisation du réseau. Toutes ces opérations consomment beaucoup d'énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les algorithmes et protocoles à faible consommation d'énergie. Dans

les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance importante, qui influence directement sur la durée de vie du réseau dans sa globalité. Pour cela, les concepteurs peuvent, au moment du développement des protocoles, négliger les autres métriques de performances telles que la durée de transmission et le débit, au profit du facteur de consommation d'énergie.

1.9 Conclusion

Les réseaux de capteurs sont une nouvelle technologie, elle est principalement répandue dans les laboratoires de recherches. Des progrès sont en cours de réalisation dans ce domaine. Néanmoins, ils correspondent à une certaine vision du futur et permettront des améliorations dans d'innombrables domaines de la vie quotidienne. Dans ce chapitre, nous avons procédé à l'étude des RCSFs. Après avoir défini les réseaux ad hoc et les RCSFs, nous avons présenté quelques différences entre ces deux réseaux. D'autres points des RCSFs sont présentés dans ce chapitre tels que : l'architecture de communication, la pile protocolaire, les applications, les facteurs et les contraintes conceptuelles.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les travaux, proposés dans la littérature, relatifs au maintien de la connectivité dans les RCSFs en tenant compte de la notion de la durée de vie du réseau.

ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES DE REMPACEMENT D'UN NŒUD DÉFAILLANT

2.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt porté aux applications des réseaux de capteurs sans fil est croissant. Dans ces applications, un ensemble de nœuds capteurs est déployé afin de rassembler des données et accomplir des tâches spécifiques en réponse à un événement par exemple. Dans la plupart des scénarios, les données captées doivent être acheminées vers la station de base en passant par plusieurs capteurs intermédiaires. En d'autres termes, les données doivent être routées de la source jusqu'à la station de base, ceci ne peut être réalisé que s'il existe un chemin de la source vers la station de base, ce qui veut dire que le réseau est connecté, i.e. le réseau n'est pas partitionné. C'est ce qu'on appelle le maintien de la connectivité, qui est critique à l'efficacité du réseau de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous classifions et citons quelques approches de maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil.

2.2 Classification des approches de maintien de la connectivité

Plusieurs travaux ont été menés dans le cadre du maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous classifions les approches trouvées dans la littérature en deux grandes classes présentées dans la figure 2.1, et qui sont : la maintenance

préventive où on trouve les approches visant à prolonger la durée de vie du réseau, et la maintenance curative qui intervient en cas de défaillance d'un nœud capteur pouvant causer le partitionnement du réseau ou laissant une partie du réseau sans couverture.

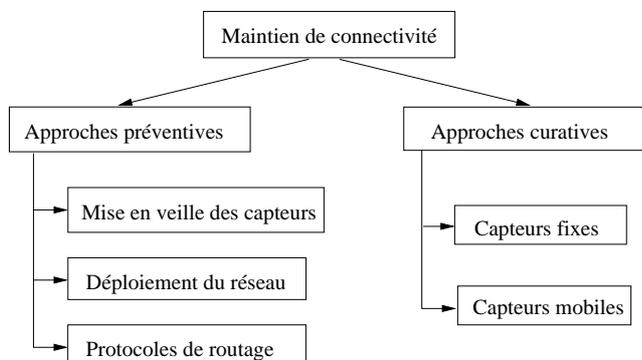


FIG. 2.1 – Classification des approches de maintien de la connectivité

2.2.1 Maintenance préventive

Les auteurs de la première classe travaillent pour maintenir le réseau de capteurs connecté le plus longtemps possible ; Ils cherchent des solutions pour prolonger la durée de vie du réseau en question, voir par exemple, les travaux [1, 10, 46, 47] qui tentent d'utiliser, à un moment donné, un minimum de capteurs assurant la connectivité et/ou la couverture du réseau, les autres capteurs sont mis en veille. Les protocoles de routage jouent également un rôle très important dans la prolongation de la durée de vie du réseau. Les chemins de routage pour l'envoi des données sont sélectionnés de manière à ce que la consommation totale d'énergie, le long du chemin, soit minime [48]. Le routage efficace dans un réseau de capteurs nécessite que le protocole de routage minimise la perte d'énergie. Pour prolonger la durée de vie du réseau, R.V. Biradar et al. dans [22] ont mis en œuvre un protocole de routage multi-sauts, où le réseau est organisé en clusters, et les données recensées des membres d'un cluster sont envoyées au cluster-head (*chef de cluster*), qui les regroupe et les transmet à la station de base par l'intermédiaire d'autres nœuds, l'avantage de ce protocole est d'économiser l'énergie d'émission pour les clusters-head qui sont plus loin de la station de base. Dans [23] Liu et Wang développent un protocole de routage pour une utilisation maximale d'énergie. Afin de minimiser la perte d'énergie et de maximiser la durée de vie du réseau, Chamam et Pierre proposent dans [49] un algorithme distribué de clustérisation, où les clusters-head sont élus suivant un message à trois étapes échangé entre chaque

capteur et ses voisins. Ils démontrent sa supériorité contre EESH, l'un des plus récents algorithmes de clustérisation [50], en termes de durée de vie du réseau et le rapport des clusters-head élus.

La solution dans cette première classe peut aussi être conçu au déploiement du réseau, voir le travail de N. Aitsaadi et all [51], le but dans cette solution est de générer la meilleure topologie réseau pour minimiser le coût de déploiement, assurer le maintien de la connectivité et la qualité de la surveillance de la zone de couverture, et optimiser aussi la durée de vie du réseau. Toujours dans la première classe, Liao et Wang [52] proposent un protocole MAC asynchrone (AMAC) et s'attaquent au problème de gaspillage d'énergie et la synchronisation de temps, due au programme de mise en veille échangé dans le cadre du protocole de base PMAC.

2.2.2 Maintenance curative

La maintenance curative est la restauration des liens de connexion, entre les nœuds capteurs, brisés suite à une défaillance d'un ou de plusieurs nœuds, causée par divers facteurs comme, par exemple, le manque d'énergie au niveau de la batterie. La solution la plus évidente est de changer la batterie en cas du manque d'énergie, ou de changer le nœud capteur en cas d'une défaillance physique par exemple. Cependant, cette solution ne peut être appliquée que dans un petit réseau constitué de capteurs, généralement, fixes et qui sont facilement accessibles. Or, dans la plupart des cas, les nœuds capteurs sont densément déployés, et dans des endroits parfois durs et difficiles d'accès, tels que : les volcans actifs dont la surveillance de leur activité est dangereuse, les champs biologiquement ou chimiquement contaminés, etc. Dans ces situations, les nœuds capteurs doivent pouvoir s'organiser pour restaurer la connectivité après défaillance. Dans ce cas, tous les nœuds capteurs ou un ensemble de ces derniers doit être susceptible de se déplacer. Les auteurs de cette deuxième classe travaillent sur le maintien de la connectivité en cas de défaillance d'un nœud capteur, voir les travaux [11, 12, 13, 53], qui essaient de régler le problème de connectivité, dans le cas du partitionnement du réseau, et/ou le problème de couverture de la zone de surveillance.

2.2.2.1 Approche DARA

L'approche DARA [11] restaure la connectivité d'un réseau partitionné en substituant le nœud défaillant par l'un de ses voisins directs (d'un seul saut). Ceux-ci en déplaçant le nœud remplaçant de sa position à la position du nœud défaillant. Les auteurs ont choisi les critères suivants pour l'élection du meilleur remplaçant :

1. Le nœud ayant moins de voisins directs.
2. Le nœud le plus proche du nœud défaillant.
3. Le nœud qui a l'identifiant le plus élevé.

En premier, le nombre de voisins est vérifié entre les voisins directs du nœud défaillant, l'élus sera celui qui a le moins de voisins directs. Si deux ou plusieurs nœuds ont un nombre égale de nœuds voisins directs, et satisfont ensemble le critère 1 alors ils passeront au critère 2. Si cette fois aussi, deux ou plusieurs nœuds ont la même distance les séparant du nœud défaillant, alors le critère 3 tranchera sur celui qui sera l'élus remplaçant. Dans l'exemple de la figure 2.2 (a), si le nœud n_1 tombe en panne alors les nœuds n_2, n_7, n_8, n_9 doivent initier la procédure de remplacement. Le nœud n_9 a le plus de voisins alors il sera exclu, pareil pour le nœud n_7 qui est de degré 2 (deux voisins). Les nœuds n_2 et n_8 ont le moins de nœuds voisins (1 voisin chacun). En supposant qu'ils ont la même distance les séparant de n_1 , le nœud n_8 sera élu remplaçant par le critère 3. La figure 2.2 (b) montre le réseau après la restauration de la connectivité. Dans le cas où le nœud n_2 sera élu remplaçant (voir la figure 2.2 (c)), le nœud n_3 devra également se déplacer.

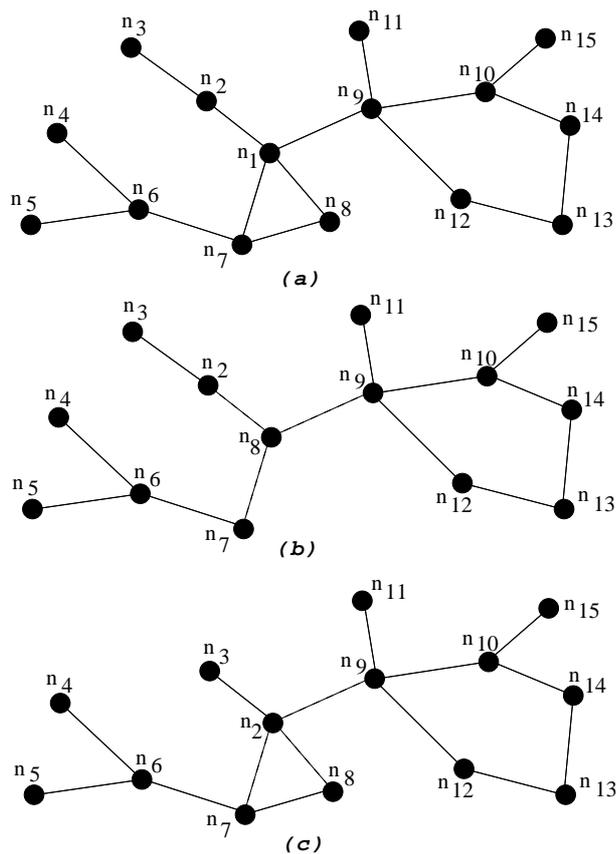


FIG. 2.2 – Exemple de scénario avec l’approche DARA

Le taux d’énergie restant de chaque nœud, qui est un facteur très important pour la durée de vie d’un RCSF, n’est pas tenu en compte lors de l’élection du nœud remplaçant, et la détection d’un nœud défaillant peut ne pas nécessiter un ajustement dans la topologie du réseau si le nœud ne divise pas le réseau en parties. Cela veut dire que la zone de couverture du nœud défaillant peut rester sans couverture si la défaillance de ce nœud en question ne partitionne pas le réseau, et cela même s’il existe des nœuds redondants aux alentours du nœud défaillant. DARA se focalise sur le maintien de la connectivité sans se préoccuper de la couverture du réseau. Dans cette approche, un remplaçant du nœud défaillant ou du nœud déplacé, laisse sa zone sans couverture même si aucun autre nœud ne peut le remplacer. En terme de couverture, ce nœud peut être considéré défaillant, en laissant sa zone sans couverture.

2.2.2.2 Approche C^3R

N. Tamboli et M. Younis [12] ont proposé une approche de remplacement d’un nœud défaillant appelé C^3R . Cette dernière maintient la connectivité et la couverture

du réseau tout en déplaçant les nœuds en va-et-vient entre leur position et la position du nœud défaillant. La figure 2.3 illustre le fonctionnement de l'approche C^3R dans le cas de la défaillance du nœud n_9 . Après la détection de la défaillance du nœud n_9 , ses nœuds voisins directs $n_1, n_2, n_3, n_{10}, n_{11}$ perdent la connectivité et se déplacent vers l'intérieur pour élaborer un plan de reprise après la défaillance de ce nœud en question. Le nœud n_{11} est le plus proche de n_9 , il l'atteint plus rapidement que les autres nœuds voisins et agit en tant que coordinateur comme le montre la figure 2.3 (b). Les nœuds récupèrent le calendrier de restauration du nœud n_{11} et reviennent à leurs positions, à l'exception du nœud n_2 , qui est le premier nœud prévu pour la restauration. La figure 2.3 de (d) à (g) montre comment les différents voisins de n_9 se déplacent en va-et-vient, successivement, pour récupérer le réseau de l'échec de ce nœud n_9 .

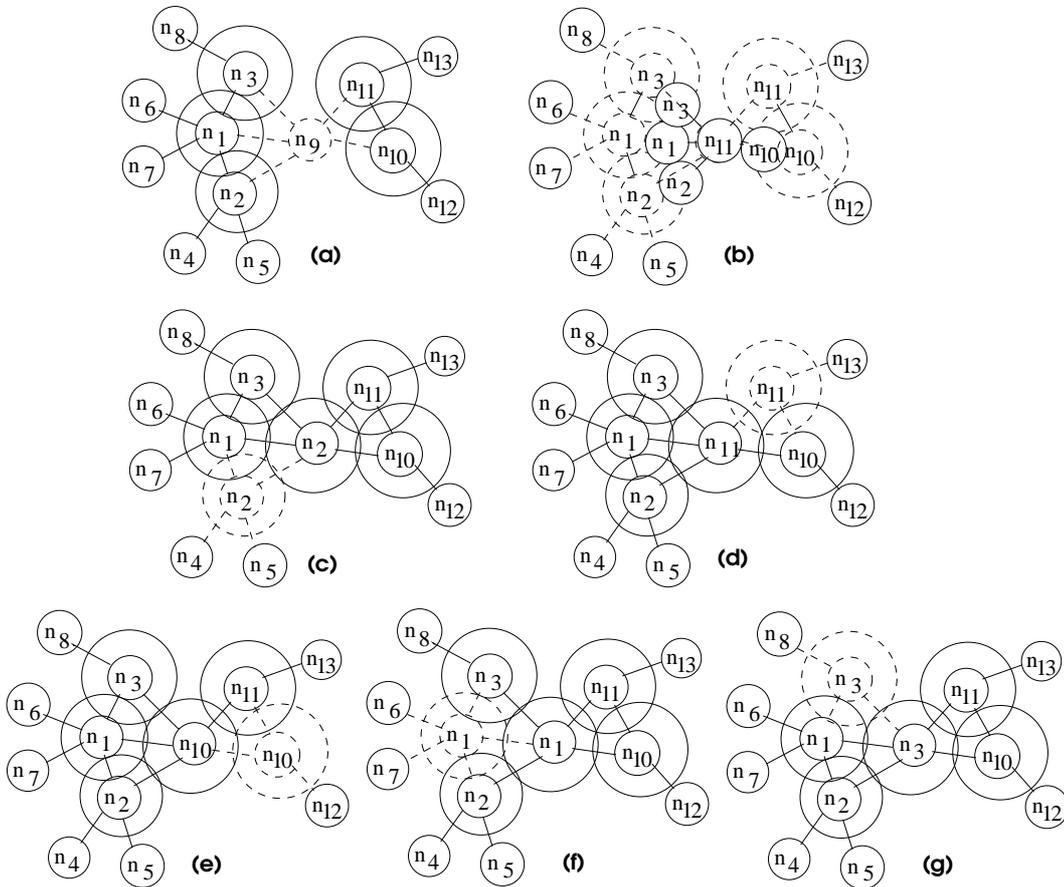


FIG. 2.3 – Exemple de fonctionnement de l'approche C^3R

Dans cette approche (C^3R), le remplacement du nœud échoué se fait juste par ses voisins directs, l'épuisement d'énergie dû aux mouvements physiques répétés de ces nœuds est un souci évident à tenir en compte. Si on se limite juste aux voisins directs,

de ce nœud en question, on risque de faire tomber plusieurs nœuds en un temps réduit et de mettre en péril le réseau tout entier. Cependant, si on veut prolonger la durée de vie du réseau, la fonction de remplacement du nœud défaillant doit être partagé par plusieurs voisins utilisant ainsi un remplacement à la chaîne. Ces remplacements doivent continuer jusqu'à arriver à un nœud à qui sa portée est totalement recouverte par ses voisins (dans ce cas, l'algorithme va se terminer), ou arriver à un nœud d'extrémité moins important en terme de connectivité du réseau global. Dans ce dernier cas, si on veut maintenir la connectivité du réseau sans se soucier de la couverture alors l'algorithme se terminera, mais si on veut maintenir ensemble la connectivité et la couverture alors l'algorithme continuera à s'exécuter si la zone de couverture du nœud déplacé n'est pas couverte par ses voisins directs.

2.2.2.3 Approche AOM

La méthode proposée dans [13], appelée AOM, consiste en 3 étapes telles que :

- la mise en œuvre du réseau,
- la détection des voisins et la détection des défaillances de nœuds,
- et enfin la restauration du réseau après l'échec d'un acteur.

Après la mise en œuvre du réseau, les étapes suivantes sont menées :

- la détermination des nœuds critiques et l'ensemble dominant de la connectivité (CDS), et
- la détermination de la politique de restauration pour chaque nœud critique.

Un nœud critique est celui qui sa défaillance partitionne le réseau. Par contre la défaillance d'un nœud dominant ne partitionne pas le réseau. Pour la détermination de nœuds critiques et l'ensemble dominant de la connectivité, les auteurs ont utilisé, respectivement, la méthode de localisation proposée par Jorgic et al [54] qui n'est pas exacte mais détecte rapidement les nœuds critiques, et la méthode CDS (Connectivity Dominating Set) proposée par Dai et Wu [55]. Si un nœud critique échoue, le réseau est partitionné en deux ou plusieurs sous réseaux. La méthode proposée par Jorgic et al permet de déterminer à quelle partie appartient chaque nœud du réseau partitionné. Les auteurs ont utilisé une politique proactive afin de reconstituer le réseau en cas d'échec d'un acteur critique. Après que des nœuds critiques dans le réseau soient déterminés, chaque nœud critique demande à ses voisins de lui envoyer la distance maximale qu'ils peuvent parcourir vers le nœud critique sans être déconnectés de leurs autres voisins. Par l'application de la méthode proposée, ils peuvent déterminer dans

quelle partition appartient chaque voisin. S'il y a un nœud dominant v au voisinage d'un nœud critique, un message est envoyé à v pour lui annoncer qu'il est obligé de remplacer le nœud critique en cas d'échec. S'il n'y a aucun nœud dominant, le mouvement maximum autorisé de chaque voisin du nœud critique est calculé. Il est à noter que certains voisins du nœud critique peuvent appartenir à une même partition. Cependant, dans chaque partition, les voisins les plus proches du nœud critique sont sélectionnés et un message est envoyé à chacun d'eux pour lui demander d'envoyer son déplacement maximum. Chaque voisin du nœud critique, qui reçoit le message, calcule la localisation (l'endroit) du plus loin de ses voisins. Par conséquent, il déterminerait combien chaque voisin du nœud critique pourrait se déplacer vers ce dernier, sans nuire à la connectivité du réseau. Au nœud critique, après réception de tous les messages des voisins, il vérifie s'il y a un voisin v , dont le `maxMovement` (mouvement maximum) couvre sa zone de couverture. Cette condition se produit si v n'a aucun autre voisin excepté le nœud critique, alors le nœud v est un bon candidat pour le remplacement. Si ce critère est tenu, v est responsable de restaurer la défaillance de ce nœud critique et il le remplacerait en cas d'échec. Si ce critère n'est pas tenu, le nœud critique calcule si le réseau pourrait être reconnecté si les nœuds voisins se déplacent par leur `maxMovement`. Le pire scénario se produit lorsque tous les nœuds voisins d'un nœud critique sont aussi critiques, comme dans l'exemple représenté dans la figure 2.4. Lorsque tous les nœuds sont critiques, il est plus probable que plusieurs nœuds doivent être déplacés afin de reconnecter le réseau.

Dans l'exemple de la figure 2.4, chaque voisin (n_2, n_4) du nœud défaillant n_3 se déplace jusqu'à ce que le réseau se connecte.

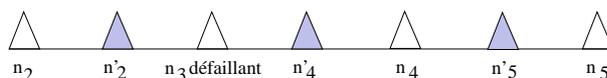


FIG. 2.4 – Exemple de scénario où tous les nœuds voisins du nœud défaillant sont critiques

Avant que n_4 se déplace vers son nouvel emplacement n'_4 , il constate que son déplacement provoque le partitionnement du réseau ; par conséquent, il envoie un message de relocalisation à n_5 . Le déplacement de n_5 ne partitionne pas le réseau ; alors, il se déplace vers son nouvel emplacement n'_5 et envoie un accusé de réception à n_4 . Dès la réception de l'accusé de réception, n_4 se déplace vers son nouvel emplacement n'_4 .

2.2.2.4 Approche Grid-Quorum

Wang et al dans [53] définissent le problème de relocalisation de capteurs en cas de défaillance, et proposent une solution de relocalisation en deux phases. La première phase consiste à identifier les capteurs redondants, en proposant la solution "quorum de grilles" (voir la figure 2.5) pour localiser rapidement ces capteurs redondants. La deuxième phase est le remplacement dans l'endroit cible en utilisant le mouvement en cascade.

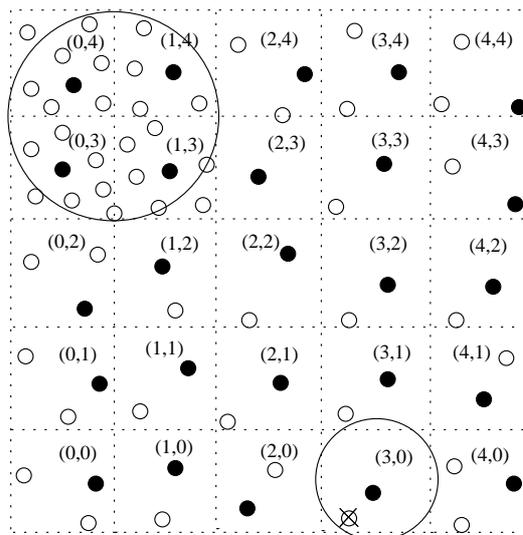


FIG. 2.5 – Modèle du système

Cette approche est motivée par la notion de quorum [56] qui est définie comme suit : Etant donné un ensemble non vide U . Une classe C est un ensemble de sous-ensembles de U . Chaque sous-ensemble P dans C est appelé quorum. La condition suivante doit être vérifiée pour les quorums dans la classe C de U :

- $\forall P \in C :: P \neq \emptyset \wedge P \subseteq U$
- Propriété minimale :
 $\forall P, Q \in C :: P \not\subseteq Q$
- Propriété d'intersection :
 $\forall P, Q \in C :: P \cap Q \neq \emptyset$

En organisant les grilles en quorums, chaque annonce et chaque requête peut être envoyé à un quorum de grilles. En raison de la propriété d'intersection du quorum, il

doit y avoir une grille qui est l'intersection de l'annonce et de la requête. La tête de grille sera en mesure de faire correspondre la requête à l'annonce. Un quorum simple peut être construit en choisissant les nœuds dans une rangée et une colonne. Au lieu d'inonder le réseau avec des annonces ou des requêtes, la requête et l'annonce ne sont envoyées qu'aux nœuds de la rangée ou de la colonne. Par exemple, comme le montre la figure 2.5, supposons que la grille (0,3) comporte des capteurs redondants, elle envoie seulement l'annonce aux grilles dans la rangée ((0,3), (1,3), (2,3), (3,3), (4, 3)) et la colonne ((0,4), (0,3), (0,2), (0,1), (0,0)). Lorsque la grille (3,0) est à la recherche de capteurs redondants, il lui suffit d'envoyer une requête aux grilles dans la rangée ((0,0), (1,0), (2,0), (3,0), (4,0)) et la colonne ((3,4), (3,3), (3,2), (3,1), (3,0)). Le nœud d'intersection (0,0) sera capable de faire correspondre la requête de (3,0) à l'annonce de (0,3). Supposons que N est le nombre de grilles dans le réseau. En utilisant ce système à base de quorum, l'overhead des messages peut être réduit de $O(N)$ (par inondation) à $O(\sqrt{N})$. Le système Grid-Quorum [53] n'exige pas l'intersection de deux quorums. Les auteurs de cette solution déploient deux classes, appelée classe *annonce* et classe *requête*, et exigent seulement que le quorum appartienne aux intersections de la classe *annonce* avec tous les quorums de la classe *requête*, et vice versa. La définition formelle est la suivante : Étant donné un ensemble non vide U , il existe une classe *annonce* Ca et une classe *requête* Cr , qui sont des ensembles de sous-ensembles de U . Chaque sous-ensemble Pa de la classe Ca est appelé un quorum *annonce* et chaque sous-ensemble Pr de la classe Cr est appelé un quorum *requête*. Supposons que la classe Ca a m quorums et la classe Cr a n quorums, les conditions suivantes doivent être vérifiées pour les quorums :

- $\cup_{i=1}^m Pa_i = U$
- $\cup_{i=1}^n Pr_i = U$
- Propriété minimale :
 - $\forall Pa, Qa \in Ca :: Pa \not\subset Qa$
 - $\forall Pr, Qr \in Cr :: Pr \not\subset Qr$
- Propriété d'intersection :
 - $\forall Pa \in Ca, \forall Pr \in Cr :: Pa \cap Pr \neq \emptyset$
 - $\forall Pr \in Cr, \forall Pa \in Ca :: Pr \cap Pa \neq \emptyset$

Pour construire un Grid-Quorum, les têtes de grilles appartenant aux grilles d'une

rangée sont organisées en un quorum, appelé quorum *annonce* et les têtes de grilles appartenant à des grilles dans une colonne sont organisées en un quorum, appelé quorum *requête*. Tous les quorums *annonces* composent la classe *annonce*, et tous les quorums *requêtes* composent la classe *requête*. De cette façon, chaque quorum *annonce* a une intersection avec tous les quorums *requêtes*, et vice versa. Quand une grille possède des capteurs redondants, la tête de grille propage cette information par le quorum *annonce* auquel elle appartient. Lorsqu'une grille veut plus de capteurs, la tête de grille doit seulement chercher dans son quorum *requête*. Comme chaque quorum *requête* a une intersection avec tous les quorums *annonces*, la tête de grille peut obtenir toutes les informations sur les capteurs redondants. Par exemple, dans la figure 2.5, les grilles (0,4), (1,4), (0,3) et (1,3) ont des capteurs redondants, tandis que la grille (3,0) a besoin de plus de capteurs. La tête de grille (1,3) propage ses informations de capteurs redondants par son quorum *annonce* ((1,4), (1,3), (1,2), (1,1), (1,0)). La tête de grille (3,0) recherche dans son quorum *requête* ((0,0), (1,0), (2,0), (3,0), (4,0)). La grille (1,0) peut répondre à l'information concernant les capteurs redondants. Pour réduire davantage la complexité des messages, les auteurs ont ajouté un critère d'arrêt quand à la propagation des messages requêtes par le quorum *requête*. Dans la recherche de capteur redondant, le plus proche est souhaité, et la propagation est arrêtée dès-que la meilleure solution soit obtenue.

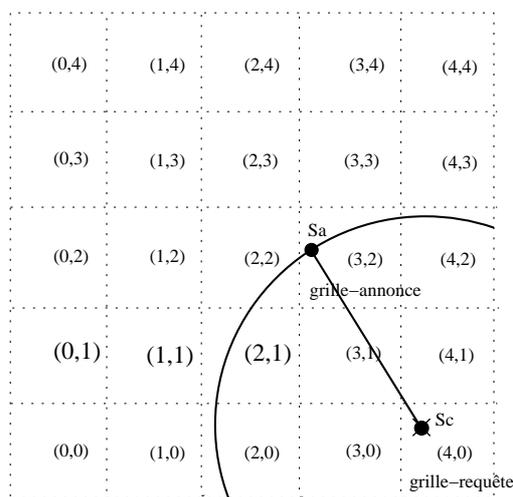


FIG. 2.6 – Critère d'arrêt de la propagation de requêtes

Pour implémenter l'idée, la tête de grille déjà visitée peut greffer l'information de son quorum *annonce* avant de transmettre le message requête à la grille suivante dans

la même rangée. Ensuite, chaque tête de grille dans ce quorum *requête* peut vérifier si un meilleur résultat peut être trouvé pour la grille qui demande. Sinon, la tête de grille peut répondre immédiatement à la grille de la requête sans propager davantage la requête. Par exemple, dans la figure 2.6, le capteur Sc tombe en panne et la grille (3,2) a un capteur redondant Sa . Tous les capteurs situés à l'extérieur du cercle, de centre Sc et de rayon la distance entre Sa et Sc , doivent être plus loin de Sc que Sa . La tête de grille (3,0) ajoute l'endroit du capteur Sa dans le message requête avant de l'envoyer. Lorsque la tête de grille (2,0) reçoit le message requête, elle ne le transmettra pas plus loin puisqu'aucun autre capteur redondant proche de Sc ne peut être trouvé. La deuxième phase de l'approche et la relocation du nœud capteur redondant trouvé, les auteurs ont choisi le mouvement en cascades.

Cette solution à deux phases peut s'avérer coûteuse en terme de temps pour la mission globale du réseaux si l'application du réseau nécessite des mesures séparées par un laps de temps très court, pour chaque nœud capteur.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes approches de maintien de la connectivité dans les RCSFs, que nous avons classé en deux grandes classes et qui sont la maintenance préventive et la maintenance curative. Nous avons également étudié et analysé certaines de ces approches pour en tirer conclusion sur leur efficacité dans le but d'améliorer ou de proposer une nouvelle approche tenant compte des caractéristiques des capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire notre approche appelée *DRFN* (Detection and Replacement of a Failing Node) qui prend en considération la durée de vie du réseau. Nous voulons que l'énergie totale consommée pour la restauration de la connectivité soit partagée par plusieurs nœuds, de sorte que la consommation d'énergie individuelle soit minimale, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau global.

DÉTECTION ET REMPLACEMENT D'UN NŒUD DÉFAILLANT POUR LE MAINTIEN DE CONNECTIVITÉ

3.1 Introduction

Dans les applications des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), les capteurs doivent coordonner les uns des autres afin de communiquer à la station de base les données recensées. Un échec d'un nœud capteur peut entraîner la perte d'un ou de plusieurs liens de communication et peut, entre autres, partitionner le réseau. Un tel scénario va entraver la collaboration des nœuds et donc avoir des conséquences très négatives sur l'application du RCSF, à savoir l'acheminement des données vers la station de base. Le maintien de la connectivité est donc une tâche très importante dans les applications des RCSFs. Dans cette partie, nous avons proposé une approche de détection et de remplacement d'un nœud défaillant [26], en tenant compte de la contrainte énergétique.

3.2 *DRFN* : Approche de détection et de remplacement d'un nœud défaillant

Etant donné l'échec d'un nœud capteur nc (à cause d'un manque d'énergie au niveau de sa batterie, d'une infection par un code malveillant, d'une défaillance logique ou physique, etc.), un de ses voisins par exemple n_i , après l'envoi d'un message d'information à ses voisins directs, se déplace pour occuper sa place et assure, ainsi, les fonctions de ce nœud défaillant nc (telles que la couverture de sa zone et le maintien de la connectivité avec ses voisins). Un des voisins du nœud n_i (celui qui a pris la

place du nœud défaillant nc) va, à son tour, prendre la place laissée par le nœud n_i et assurera, également, ses fonctions. Le même processus de remplacement se poursuivra jusqu'à :

- arriver à un nœud qui sa zone est totalement recouverte par ses voisins ; ou bien
- arriver à un nœud qui n'a aucun autre voisin autre que le nœud sujet pour le remplacement. Dans ce cas, ce nœud doit assurer ses fonctions et les fonctions du nœud remplacé en intermittence, en faisant des va-et-vient entre sa place et la place du nœud remplacé, jusqu'à ce que son poids diminue par rapport aux poids des autres voisins du nœud remplacé, dans ce cas le nœud qui a le poids le plus élevé sera élu pour le remplacement.

L'idée c'est d'impliquer, dans le remplacement, un nœud qui a un potentiel d'énergie plus élevé qu'un nœud qui a un faible potentiel d'énergie. Le nombre de voisins et la distance entre les nœuds capteurs peuvent aussi être des critères importants. L'implication de plusieurs nœuds permet de partager l'énergie consommée et ainsi prolonger la durée de vie du réseau tout entier.

En cas de présence de plusieurs voisins du nœud défaillant ou du nœud élu remplaçant, quel est le processus à suivre pour être élu remplaçant ? Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Supposons que celui qui a moins de voisins (moins chargé) sera élu. Dans ce cas si le nœud est faible en terme d'énergie, il sera peut être préférable de prendre un autre avec un potentiel d'énergie plus élevé ;
- Supposons, maintenant, qu'on favorise à l'élection celui qui a un potentiel d'énergie plus élevé. Dans ce cas, si le nœud a un grand nombre de voisins, ce qui veut dire qu'il est un nœud de relais très important en terme de connectivité, il sera alors préférable de favoriser l'élection d'un autre nœud avec un nombre inférieur de voisins ;

Pour cela, un compromis entre le potentiel d'énergie et le nombre de voisins s'impose, sans oublier la distance le séparant du nœud échoué ; Car si cette distance est grande, l'énergie épuisée due au mouvement physique de ce nœud est grande et la probabilité pour que ce nœud soit élu doit diminuer, alors son poids diminue. Pour cela, nous

définissons le poids d'un nœud ($pnci$) [26], par rapport à son pourcentage d'énergie et son nombre de voisins ainsi que la distance le séparant du nœud échoué, de la manière suivante :

$$pnci = \frac{\% \text{ énergie}}{\alpha \times \text{nombre_voisins} + \beta \times \text{distance}} \quad (3.1)$$

Telles que :

- $distance$ est la distance le séparant du nœud échoué
- α, β sont des variables empiriques (fixées à 1)

Ainsi, si le pourcentage d'énergie diminue alors le poids du nœud diminue et sa probabilité, pour qu'il soit élu, diminue. De même, si le nombre de voisins augmente (ce qui explique peut être la surcharge de ce nœud) alors le poids du nœud diminue (voir la figure 3.1) et sa probabilité pour qu'il soit élu diminue aussi. De la même manière, à chaque fois que la distance est grande, l'énergie de déplacement du nœud est grande, le poids de ce dernier diminue alors sa probabilité pour qu'il soit élu diminue.

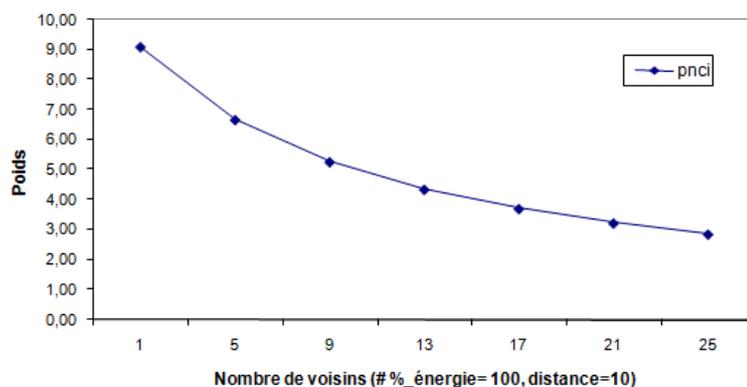


FIG. 3.1 – Variation du poids des nœuds capteurs selon le nombre de voisins directs (% d'énergie et distance sont fixées)

Le processus de détection d'un nœud défaillant est illustré dans l'algorithme 1 (Detect-fail()) où nous décrivons les instructions que doit exécuter un nœud capteur pour détecter la défaillance d'un nœud voisin. Le nœud capteur envoie un petit message *detect* puis attend une certaine durée avant de juger que le nœud capteur est défaillant. Après cette durée, qui est égale au temps d'aller-retour du message plus le temps de

traitement, si le nœud capteur émetteur du message *detect* ne reçoit pas de réponse alors il considère le nœud destinataire du message défaillant, et le processus se répète après une attente bien définie.

Algorithm 1 Detect-fail()

1 : Envoyer un petit message *detect* ;
 2 : Attendre *dt1* ;
 3 : Si pas de réponse du voisin *n* alors
 4 : *n* est défaillant ;
 5 : Fin si ;
 6 : Attendre *dt2* ;
 7 : Aller à 1 ;;

Tels que : *dt1* représente le temps d'attente de la réponse avant de juger que le capteur est défaillant, et *dt2* représente le temps séparant deux messages *detect*.

PROPOSITION 1 *Si la taille du message augmente alors le temps d'attente dt1, pour juger que le capteur est défaillant, augmente ; et quand le débit de transmission augmente, le temps d'attente dt1 diminue.*

PROOF 1 *dt1 est le temps suffisant pour qu'un capteur c reçoit une réponse : il est égal à la somme du temps d'aller-retour d'un message (deux fois le temps de transmission t_{trans}) du capteur c au voisin direct le plus éloigné et le temps de traitement (t_{trait}) du message par le capteur le recevant, plus un temps perdu ϵ qui peut être causé par un obstacle ou autres (voir formule 3.2).*

$$dt1 = 2 \times t_{trans} + t_{trait} + \epsilon \quad (3.2)$$

On a aussi :

$$t_{msg} = d_{trans} \times t_{trans} \quad (3.3)$$

Tels que : t_{msg} : est la taille du message envoyé,

d_{trans} : est le débit de transmission.

La formule 3.3 implique que :

$$t_{trans} = \frac{t_{msg}}{d_{trans}} \quad (3.4)$$

On remplace la formule 3.4 dans la formule 3.2, on aura :

$$dt1 = \frac{2 \times t_{msg}}{d_{trans}} + t_{trait} + \epsilon \quad (3.5)$$

Ainsi, dans la formule 3.5 on remarque que si la taille du message t_{msg} augmente alors le temps d'attente $dt1$, pour juger que le capteur est défaillant, augmente ; Et quand le débit de transmission d_{trans} augmente alors le temps d'attente $dt1$ diminue.

Le processus de remplacement est illustré, d'une manière globale, dans l'algorithme 2 (repl-fail()) où nous avons décrit la réaction d'un nœud capteur donné face à une détection d'un nœud capteur défaillant ou d'un nœud capteur déplacé, et la réaction d'un nœud capteur s'il est élu remplaçant. L'algorithme se déclenche s'il y a une détection d'un nœud défaillant ou déplacé et lorsqu'un nœud capteur est élu remplaçant. Si un nœud est élu remplaçant alors il se déplace d'abord pour assurer les fonctions du nœud défaillant ou déplacé, puis il se comporte selon l'état de sa liste de voisins directs. Si elle n'est pas vide alors il ne fait rien car ses voisins directs vont élire, à leur tour, un remplaçant pour le remplacer ; mais si sa liste de voisins directs est vide alors il sera obligé de retourner à sa place après un quantum de temps bien défini.

Algorithm 2 repl-fail()

- 1 : Si nœud v défaillant ou déplacé détecté alors
 - 2 : Pour tout $n \in$ à la liste des voisins directs faire
 - 3 : envoyer un message d'information de déplacement ;
 - 4 : Fin Pour ;
 - 5 : se déplacer de $Rc/2$ vers le nœud v pour élire un remplaçant ;
 - 6 : Fin Si ;
 - 7 : Si élu remplaçant alors
 - 8 : se déplacer pour assurer les fonctions du nœud défaillant ou déplacé ;
 - 9 : Si sa liste de voisins directs est vide alors
 - 10 : rester un quantum de temps ;
 - 11 : retourner à sa place ;
 - 12 : Fin Si ;
 - 13 : Fin Si ;
-

PROPOSITION 2 *Etant donné un réseau de capteurs sans fil où tous les capteurs ont le même rayon de communication R_c . Le déplacement des nœuds voisins, vers le nœud défaillant, d'une distance de $R_c/2$ pour élire un remplaçant est une condition suffisante pour se connecter et échanger des messages.*

PROOF 2 *Etant donnés deux nœuds capteurs nc_1 et nc_2 , voisins les plus loin du nœud défaillant f situé au centre du cercle trigonométrique de la figure 3.2, nous avons alors :*

$$d^2 = x^2 + (z + y)^2 \quad (3.6)$$

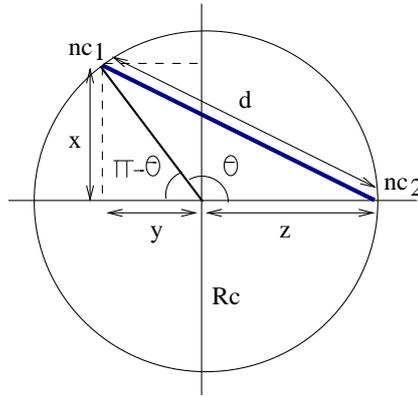


FIG. 3.2 – Distance entre deux voisins d'un nœud donné

Nous avons aussi :

$$x = \sin(\Pi - \theta) \quad (3.7)$$

$$z = 1 \quad (3.8)$$

$$y = \cos(\Pi - \theta) \quad (3.9)$$

Par remplacement nous avons :

$$d^2 = \sin(\Pi - \theta)^2 + (1 + \cos(\Pi - \theta))^2 \quad (3.10)$$

Ce qui implique que :

$$d = \sqrt{\sin(\Pi - \theta)^2 + (1 + \cos(\Pi - \theta))^2} \quad (3.11)$$

Dans la formule 3.11, d atteint son maximum quand $\cos(\Pi - \theta)$ sera égal à 1. Ce qui implique que $\Pi - \theta = 0 \Rightarrow \Pi = \theta$. Alors ces nœuds sont sur la même ligne avec le nœud défaillant f (voir figure 3.3).

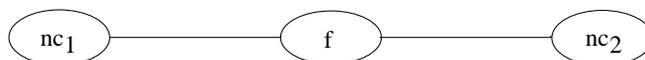


FIG. 3.3 – Distance max entre les voisins d'un nœud donné

La distance la plus longue qu'on peut avoir entre les voisins du nœud f est égale à $2 \times Rc$ (i.e. la distance séparant nc_1 de nc_2 est de $2 \times Rc$).

Supposons maintenant que les nœuds nc_1 et nc_2 se déplacent tous les deux de $Rc/2$ vers le nœud f alors ils parcourent une distance Rc .

Ce qui implique que la nouvelle distance entre nc_1 et nc_2 sera égale à $2 \times Rc - Rc = Rc$, c'est exactement le rayon de communication de ces nœuds capteurs, alors ils seront connectés et ils peuvent communiquer entre eux.

3.2.1 Exemple de scénario

La figure 3.4 montre un ensemble de nœuds composants un réseau de capteurs sans fil. Si le nœud capteur nc_6 échoue alors l'ensemble des nœuds $\{nc_1, nc_2, nc_5, nc_9\}$ sera déconnecté du réseau.

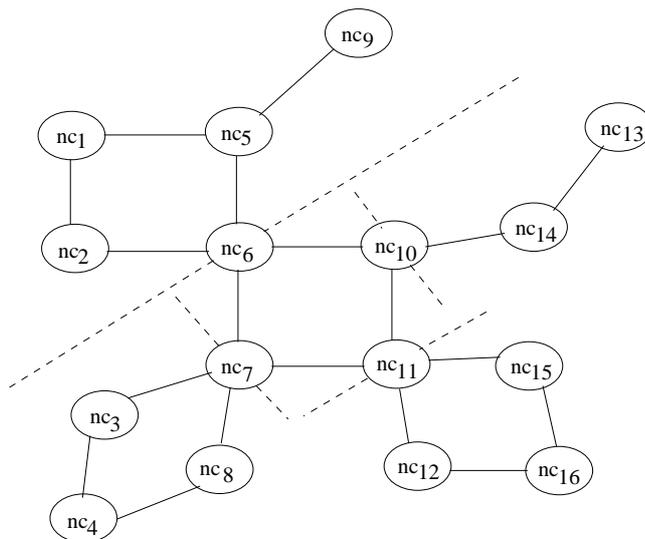


FIG. 3.4 – Réseau connecté de nœuds capteurs susceptibles de se déplacer

De même, si le nœud nc_7 échoue alors c'est l'ensemble $\{nc_3, nc_4, nc_8\}$ qui sera déconnecté du reste du réseau.

Et si c'est les nœuds nc_{10} ou nc_{11} qui échouent alors c'est l'ensemble $\{nc_{13}, nc_{14}\}$ ou l'ensemble $\{nc_{12}, nc_{15}, nc_{16}\}$, respectivement, qui sera déconnecté du reste du réseau.

Supposons, maintenant, que tous les nœuds ont un potentiel d'énergie égal et la distance entre les nœuds est la même :

3.2.1.1 Cas 1 : défaillance d'un seul nœud

Supposons que le nœud nc_{10} échoue :

- Parmi ses voisins, le nœud nc_{14} a un nombre moins de voisins alors il sera élu pour remplacer nc_{10} ,
- nc_{13} est le seul voisin de nc_{14} il sera alors élu d'office pour le remplacer,
- Le nœud nc_{13} n'a aucun autre voisin autre que le nœud nc_{14} , alors il doit assurer ses fonctions et celles du nœud nc_{14} en faisant des va-et-vient entre sa zone et la zone laissée du nœud nc_{14} à des quantum de temps bien défini. A chaque fois que nc_{13} retourne dans sa zone, il négocie l'élection avec nc_{14} . Une fois que le poids du nœud nc_{13} diminue par rapport au poids du nœud nc_{14} , ce nœud nc_{14} va à son tour participer aux remplacements impliquant ainsi ses nouveaux voisins.

3.2.1.2 Cas 2 : défaillance multiple 1

Si les nœuds capteurs nc_6 et nc_7 échouent, les ensembles de nœuds $\{nc_1, nc_2, nc_5, nc_9\}$ et $\{nc_3, nc_4, nc_8\}$ seront déconnectés du réseau.

- Parmi les voisins du nœud échoué nc_6 , le nœud nc_2 a le plus petit nombre de voisins, alors il sera élu pour remplacer le nœud nc_6 ;
- Le nœud nc_1 est le seul voisin du nœud nc_2 , il sera élu pour le remplacer ;
- Les nœuds nc_3 et nc_8 ont le même nombre de voisins. Dans ce cas, le nœud qui a le plus petit indice (nc_3) sera élu pour remplacer le nœud défaillant nc_7 ;
- Le nœud nc_4 est le seul voisin du nœud nc_3 , il sera élu pour le remplacer.

Le même processus continue jusqu'à arriver à un nœud où sa zone de couverture est totalement couverte par ses voisins, ou arriver à un nœud d'extrémité où sa place est moins importante en terme de connectivité du réseau global.

3.2.1.3 Cas 3 : défaillance multiple 2

Supposons maintenant la défaillance des nœuds nc_6 et nc_8 . Le problème dans ce cas est que le nœud nc_7 est le voisin de deux nœuds défaillants, il doit participer pour élire un remplaçant pour un seul des nœuds défaillants. Si les défaillances des nœuds nc_6 et nc_8 sont détectées à différents moments, le nœud nc_7 participera pour élire un remplaçant pour le premier nœud défaillant détecté. Mais si les défaillances sont détectées en même temps, il doit participer pour élire un remplaçant pour le nœud défaillant qui a le plus petit indice. Le même processus continue comme décrit dans les cas 1 et 2.

L'échoue de quelques nœuds (par exemple les nœuds d'extrémité) n'a pas un effet sur la connectivité du réseau, mais ont un effet sur la couverture du réseau. Pour cela, notre algorithme de remplacement doit être déclenché quelque soit le nœud défaillant. Ainsi on pourra garantir la couverture et la connectivité du réseau en même temps.

3.3 Evaluation

Nous évaluons notre approche par rapport à l'approche C^3R [12], en prenant comme métrique la distance parcourue, le nombre de nœuds impliqués pour la restauration de la connectivité, le pourcentage de réduction de la zone de couverture, et la génération des messages overhead.

3.3.1 Paramètres de simulation

Les résultats de simulation sont donnés par notre propre simulateur. Dans l'expérimentation, un ensemble de nœuds capteurs susceptibles de se déplacer est initialement placé au hasard sur une zone de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ pour former un RCSF. Tous les nœuds sont supposés avoir les mêmes rayons de communication et de couverture. Nous mesurons : Premièrement, la différence et le nombre de déplacements en fonction du temps pour les approches *DRFN* et C^3R . Ensuite, le pourcentage de réduction du champ de couverture pour les populations de nœuds de 75 et 200 en variant le champ de captage ; et finalement, le total des paquets échangés en fonction du champ de communication.

3.3.2 Distance parcourue et le nombre de nœuds impliqués pour restaurer la connectivité

Etant données les hypothèses suivantes :

- Tous les nœuds sont susceptibles de se déplacer ;
- Le temps de déplacement d'un nœud à un autre nœud voisin est de n secondes ;
- L'application du réseau nécessite des mesures en maximum chaque m secondes pour chaque capteur ;
- Les distances entre les nœuds voisins sont égales à d ;
- Le temps d'envoi, de réception et de traitement des messages ainsi que le temps d'élection de remplaçant sont négligés.

Nous prenons, pour l'analyse, une période de temps de 150 secondes. Durant cette période, le nombre de déplacements, représenté dans la figure 3.5, effectués avec l'approche C^3R est de 8, ce qui fait que la distance totale parcourue est de $8d$ (d est la distance entre les nœuds voisins), contre 5 déplacements ($5d$) avec l'approche $DRFN$. Le nombre de nœuds impliqués dans le remplacement est de 5 pour l'approche $DRFN$, contre 4 nœuds pour l'approche C^3R (c'est exactement le nombre de voisins directs du nœud défaillant).

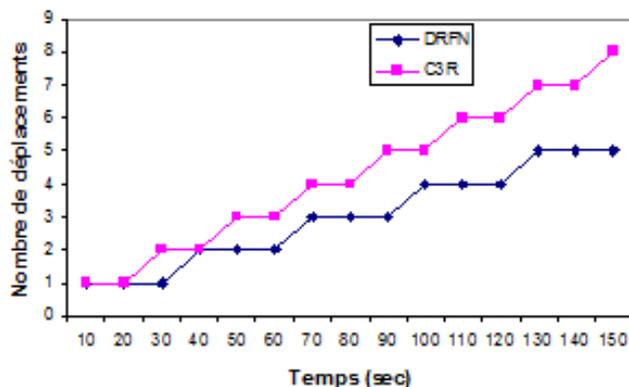


FIG. 3.5 – Nombre de déplacements de capteurs par unité de temps avec les approches $DRFN$ et C^3R

La figure 3.6 montre la différence du nombre de déplacements entre les approches $DRFN$ et C^3R par unité de temps, nous remarquons que la différence du nombre de déplacements entre $DRFN$ et C^3R s'allonge avec le temps.

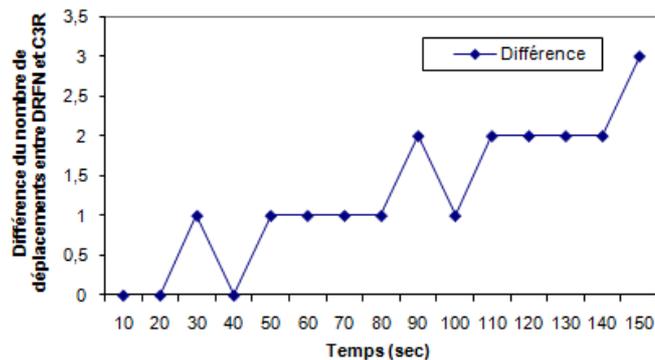


FIG. 3.6 – Différence du nombre de déplacements entre *DRFN* et *C³R* par unité de temps

La figure 3.7 montre le résultat de la simulation selon les hypothèses énoncées, elle montre que, pour chaque période de 120 unités de temps, la formule 3.12 est vérifiée :

$$nbr_dpl(C^3R) = \frac{3}{2} \times nbr_dpl(DRFN) \quad (3.12)$$

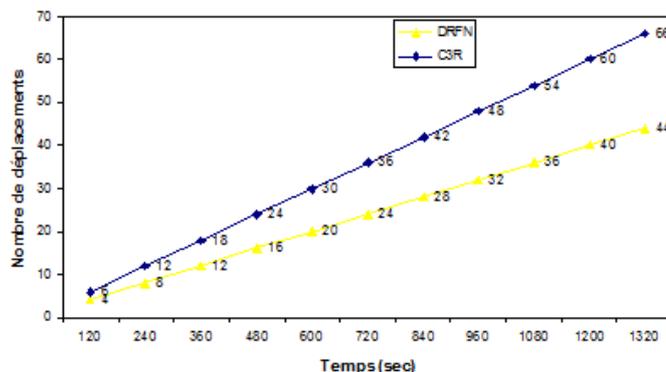


FIG. 3.7 – Nombre de déplacements par unité de temps pour une période de temps de 1320 sec

Ce qui fait que l'énergie totale consommée, due au déplacement avec l'approche *C³R*, est égale à 3/2 fois celle consommée due au déplacement avec l'approche *DRFN* pendant la même période de temps. Ce qui implique aussi que l'énergie consommée individuellement par chaque nœud impliqué dans le remplacement avec l'approche *DRFN* est beaucoup moins inférieure à celle consommée individuellement par chaque

nœud impliqué dans le remplacement avec l'approche C^3R . Car le nombre de nœuds impliqués dans le remplacement avec l'approche *DRFN* est beaucoup plus supérieur à celui dans l'approche C^3R .

Les résultats illustrés dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7 renforcent l'importance de notre approche *DRFN* par rapport à l'approche C^3R , en terme de déplacement pour le remplacement d'un nœud défaillant. Pour cela, notre approche *DRFN* consomme moins d'énergie que l'approche C^3R pour remplacer un nœud défaillant.

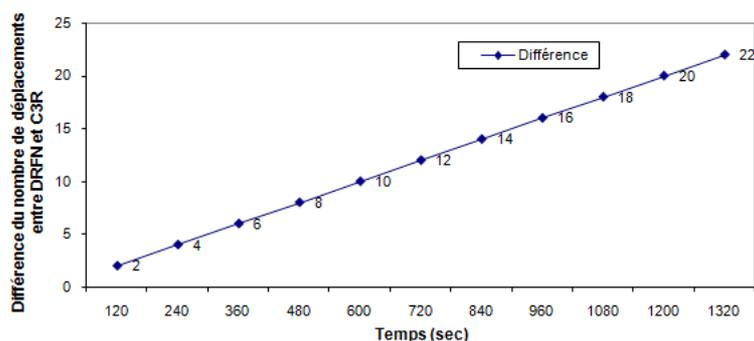


FIG. 3.8 – Différence du nombre de déplacements entre *DRFN* et C^3R pour une période de temps de 1320 sec

La différence du nombre de déplacements entre les approches *DRFN* et C^3R , représentée dans la figure 3.8, est une suite arithmétique de raison 2 pour les valeurs de temps multiplicatrices de 120. Cette différence renforce l'importance de notre approche *DRFN* pour le remplacement d'un nœud défaillant.

3.3.3 Pourcentage de réduction de la couverture réseau

Cette métrique est importante car elle nous donne le pourcentage de réduction du champ de couverture après l'exécution du processus de restauration de la connectivité après la défaillance d'un nœud capteur.

La réduction de la couverture réseau est mesurée par la moyenne de l'ensemble de la couverture du champ enregistré à différentes instances de temps au cours de la durée de vie du réseau. L'ensemble du champ est divisé en une grille de points et la

couverture est calculée en utilisant la méthode de calcul de la couverture telle que décrite dans [12].

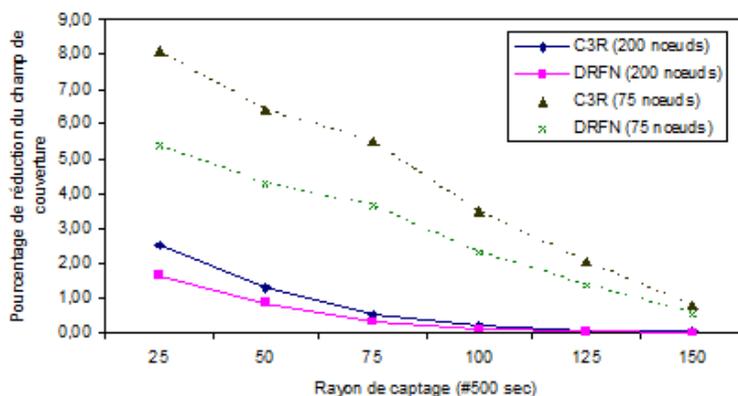


FIG. 3.9 – Réduction du champ de couverture pour les populations de nœuds de 75 et 200 en faisant varier le rayon de captage

La figure 3.9 montre l'impact de la restauration de la connectivité sur la couverture du réseau, mesurée en terme de pourcentage de réduction du champ de couverture par rapport au niveau de pré-échec. L'approche *DRFN* réduit significativement la perte de couverture et ce, en minimisant le nombre de déplacements au cours de l'exécution du processus de restauration de la connectivité. Pendant le temps de déplacement, le nœud capteur déplacé laisse sa zone sans couverture. Ainsi, si le nombre de déplacements augmente, le pourcentage de réduction du champ de couverture augmente. C'est ce qui explique le résultat dans la figure 3.9 où nous avons toujours un pourcentage de réduction de champ de couverture moins élevé dans notre approche *DRFN* par rapport à l'approche connexe *C³R*. En effet, pour restaurer la couverture après une défaillance de nœud capteur, notre approche *DRFN* utilise moins de déplacements que l'approche *C³R*. Lorsque les nœuds capteurs sont déployés avec une grande densité (cas de 200 nœuds), le pourcentage de réduction de la zone de couverture est moins élevé que lorsque les nœuds capteurs sont déployés avec une petite densité (cas de 75 nœuds). Lorsque les nœuds capteurs sont déployés avec une grande densité, la distance entre les nœuds voisins est plus petite, alors le temps de déplacement pour remplacer un nœud capteur défaillant est plus petit. Cela s'explique, dans la figure 3.9, par la diminution du pourcentage de réduction de la zone de couverture.

3.3.4 Overhead additionnel

Comme beaucoup de travaux, notre approche génère une charge supplémentaire, due à la détection du nœud défaillant et l'élection d'un remplaçant par les voisins directs du nœud défaillant ou déplacé (voir la figure 3.10).

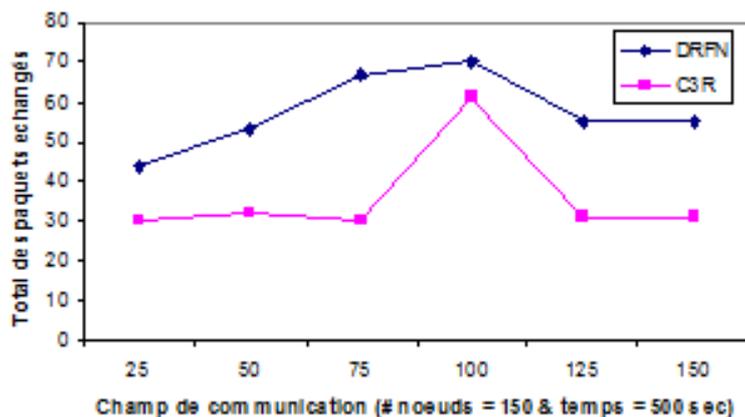


FIG. 3.10 – Messages overhead

Nous remarquons dans la figure 3.10 que notre approche *DRFN* génère un peu plus de messages que l'approche *C³R*. Cela s'explique par rapport à la politique de l'approche où les étapes à suivre pour remplacer un nœud défaillant diffèrent. Dans l'approche *C³R*, le remplacement du nœud défaillant ne se fait que par ses voisins directs et les messages pour l'élection d'un nœud remplaçant sont seulement interchangeés entre ces voisins directs. Mais dans l'approche *DRFN*, le nœud élu pour le remplacement doit aussi être remplacé, et les voisins directs de ce nœud remplaçant doivent se déplacer également et interchanger des messages pour élire un remplaçant pour le nœud déplacé. C'est ce qui explique l'overhead des messages, qui est un peu plus élevé dans notre approche *DRFN* que dans l'approche *C³R*.

Le nombre de déplacements avec notre approche *DRFN* est inférieur au nombre de déplacements avec l'approche *C³R*. Pour 120 sec, on note 4 déplacements avec *DRFN* contre 6 déplacements avec *C³R*. Le nombre de déplacements augmente avec le temps. Pour 1320 sec, on note 44 déplacements avec l'approche *DRFN* et 66 avec l'approche *C³R*. Cela explique que la quantité d'énergie consommée avec l'approche *DRFN* est inférieure à la quantité d'énergie consommée avec l'approche *C³R*. Par

rapport à la réduction du champ de couverture, notre approche *DRFN* réduit moins le champ de couverture. Pour 75 nœuds et un champ de captage de 25 mètres, notre approche *DRFN* réduit de 5.40% le champ de couverture durant 500 sec contre 8.10% avec l'approche *C³R*. Le pourcentage de réduction de champ de couverture diminue pour les deux approches en augmentant le champ de captage. Pour 150 mètres notre approche réduit de 0.53% le champ de couverture contre 0.80% avec l'approche *C³R*. En augmentant la densité des nœuds, le pourcentage de réduction de champ de couverture diminue. Pour 200 nœuds et un champ de captage de 25 mètres, notre approche *DRFN* réduit de 1.67% le champ de couverture contre 2.50% avec l'approche *C³R*. Pour un champ de captage de 150 mètres, notre approche *DRFN* réduit de 0.01% le champ de couverture contre 0.02% avec l'approche *C³R*. Par rapport à ses chiffres, nous concluons que le pourcentage de réduction de champ de couverture diminue avec l'augmentation du champ de captage ou avec l'augmentation de la densité des nœuds, et notre approche le réduit moins. Par rapport au nombre de paquets échangés, on note que notre approche *DRFN* génère un peu plus de paquets que l'approche *C³R*, car le nombre de nœuds impliqués dans le remplacement du nœud défaillant avec notre approche est supérieur au nombre de nœuds impliqués dans le remplacement avec l'approche *C³R*.

3.4 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement déployés dans des environnements durs et difficiles d'accès où les pannes ou défaillances de nœuds capteurs sont possibles. Ces défaillances de nœuds peuvent nuire à la connectivité du réseau tout entier. Autrement dit, le réseau peut être partitionné où certains nœuds peuvent être déconnectés du réseau global. Ce qui implique une perte de connectivité entre les parties de ce dernier.

Pour répondre à cette perte de connectivité, nous avons proposé une approche de détection et de remplacement d'un nœud défaillant. Notre solution est basée sur deux algorithmes : le premier consiste à détecter le nœud défaillant en se basant sur un laps de temps prédéfini. Après chaque laps de temps, le nœud qui ne répond pas est considéré défaillant. Le second algorithme est de remplacer le nœud défaillant détecté en effectuant une chaîne de remplacement suivant un algorithme distribué. Le but

principal de cette approche est de restaurer la connectivité du réseau en exploitant la mobilité des capteurs, en tenant compte de la contrainte d'énergie. L'idée est de partager la consommation d'énergie, nécessaire à la restauration de la connectivité, avec plusieurs capteurs pour minimiser les défaillances précoces des nœuds capteurs, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau tout entier. Pour cela, nous avons évalué notre approche *DRFN* avec une approche connexe *C³R*. Les résultats de la simulation montrent bien que durant la même période, le taux d'énergie consommée avec l'approche *DRFN* est inférieur au taux d'énergie consommée avec l'approche *C³R*. Ce taux d'énergie consommée avec l'approche *DRFN* est aussi partagé par plus de nœuds qu'avec l'approche *C³R*. Ce qui explique que la quantité d'énergie individuelle consommée par les nœuds capteurs dans notre approche *DRFN* est beaucoup plus petite que dans l'approche *C³R*. Par rapport à la couverture du réseau, avec notre approche *DRFN*, le pourcentage de réduction de champs de couverture est moins élevé que dans l'approche connexe *C³R*. Pour 75 nœuds et un champs de captage de 25 mètres durant une période de 500 secondes, notre approche *DRFN* réduit à moins de 2.7% le champs de couverture par rapport à l'approche *C³R*. Ce pourcentage diminue en augmentant le champs de captage (pour 150 mètres, on note 0.27%) et la densité de nœuds (pour 200 nœuds et un champs de captage de 25 mètres, on note 0.83%. Cependant, pour un champs de captage de 150 mètres, on note 0.01%). Pour restaurer la connectivité après défaillance d'un nœud capteur, notre approche *DRFN* utilise moins de déplacements que l'approche *C³R*. Nous remarquons que la différence du nombre de déplacements est de 22 pour une période de temps de 1320 secondes. La quantité d'énergie nécessaire pour ces 22 déplacements est stockée dans notre approche *DRFN*, et contribue efficacement à prolonger la durée de vie du réseau.

Les résultats de l'évaluation montrent que notre approche de restauration de la connectivité consomme moins d'énergie, et améliore le pourcentage de réduction de champs de couverture. L'optimisation des valeurs de α et β dans la formule 3.1 est un problème important qui sera discuter dans les travaux futurs.

Le chapitre suivant est consacré à notre deuxième contribution au problème posé, où nous avons proposé une approche de remplacement d'un nœud défaillant en utilisant une table de voisins à deux sauts.

REEMPLACEMENT D'UN NŒUD DÉFAILLANT EN UTILISANT UNE TABLE DE VOISINS À DEUX SAUTS

4.1 Introduction

La durée de vie dans un réseau sans fil, en particulier un réseau de capteurs sans fil, dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité tels que : le manque d'énergie au niveau d'un nœud important, infection d'un nœud vital par un code malveillant, une défaillance logique ou physique d'un nœud primaire etc. Cette rupture peut conduire dans certains cas à une reconfiguration du réseau en engendrant ainsi un overhead préjudiciable ou dans d'autres cas à un échec de la mission assignée au réseau.

Pour la restauration de la connectivité, nous avons proposé l'approche de remplacement d'un nœud défaillant qui utilise une table de voisins à deux sauts (2HTA) [25], pour le maintien de la connectivité, en effectuant une chaîne de remplacements suivant un algorithme distribué. L'objectif visé est de minimiser l'énergie totale consommée, nécessaire pour la restauration de la connectivité, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau global.

4.2 2HTA : Approche de remplacement à la chaîne d'un nœud défaillant en utilisant une table de voisins à deux sauts

Après le déploiement du réseau, les nœuds capteurs s'échangent régulièrement un message *detect* pour détecter d'éventuels nœuds défaillant [26], un nœud ne répondant pas à un message *detect*, après un laps de temps bien défini, est considéré défaillant par l'émetteur du message. Ainsi le message *detect* est envoyé par les nœuds pour vérifier leur connectivité avec leurs voisins. Pour découvrir leurs voisins d'un et de deux sauts, les nœuds capteurs s'échangent des messages contenant l'identifiant du nœud et son poids. Chaque nœud capteur crée une table de voisins nommée *table_neighbors* pour sauvegarder ses voisins découverts. Dès que le poids d'un nœud capteur diminue, il diffuse à ses voisins un message de mise à jour *update_sensor* ; Si un capteur reçoit un message *update_sensor* alors il met à jour sa table *table_neighbors*. Si l'émetteur de ce message est un voisin direct alors il le rediffuse à ses voisins, sinon il le supprime pour éviter que ce message arrive aux nœuds capteurs non concernés. Le processus de remplacement est illustré d'une manière globale dans l'algorithme 3.

Algorithm 3 repl-fail()

```

1 : Si un nœud défaillant nc détecté alors
2 :   Mettre élu à vrai ;
3 :   Pour tout capteur  $c \in table\_2\_sauts$  faire
4 :     Si (c est voisin de nc) et ( $poids(c) > mon\_poids$ ) alors
5 :       mettre élu à faux ;
6 :     Fin Si ;
7 :   Fin Pour ;
8 : Fin Si ;
9 : Si élu = vrai alors
10 :   Envoyer un message de déplacement à ses voisins directs ;
11 :   Se déplacer et assurer les fonctions du nœud défaillant nc ;
12 : Fin Si ;

```

Les voisins du nœud élu remplaçant doivent faire de la même manière, et le même processus continue ; Un nœud n'ayant aucun voisin pour le remplacer, s'il est élu, doit

retourner à sa zone de couverture après un quantum de temps, pour assurer sa fonction de couverture ; Après son retour à sa zone, on revient à l'algorithme de détection de nœud défaillant et on refait le processus de remplacement à zéro. Si ce nœud qui a été élu et qui n'a pas de voisins commence à épuiser son énergie, due au mouvement physique de l'aller-retour, alors son poids diminue et sa probabilité pour qu'il soit élu une autre fois diminue également.

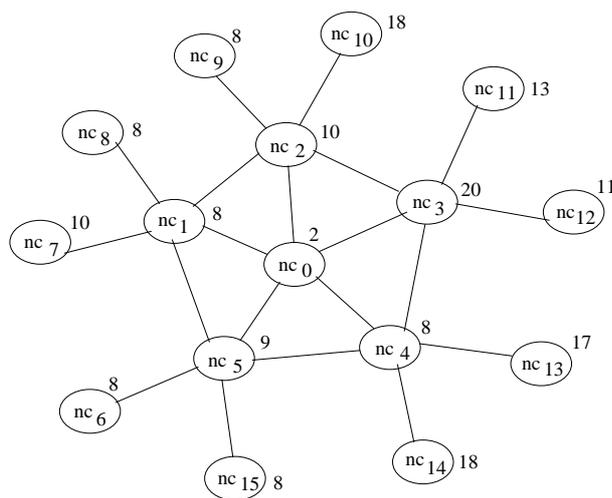


FIG. 4.1 – Réseau connecté de nœuds capteurs susceptibles de se déplacer

Supposons que le nœud capteur nc_0 , de la figure 4.1, tombe en panne pour une cause donnée (manque d'énergie par exemple). Au déploiement du réseau, chaque nœud capteur nc doit créer et mettre à jour deux tables : table "Poids des voisins d'un et de deux sauts" (table 4.1) et table "Voisins à deux sauts" (table 4.2).

TAB. 4.1 – Poids des voisins d'un et de deux sauts

Num_neigh	Weight_neigh

TAB. 4.2 – Voisins à deux sauts

Num_neigh	Num_2neigh

La table 4.1 permet au nœud capteur nc de sauvegarder les poids de ses voisins directs et des voisins de ses voisins (voisins à deux sauts). La table 4.2 lui donne le(s) nœud(s) passerelle(s) avec ses voisins à deux sauts, qui est une information importante à sa prise de décision pour le remplacement d'un nœud voisin défaillant.

Pour le capteur nc_1 (poids = 8), les tables 4.1 et 4.2 remplies sont présentées par les tables 4.3 et 4.4.

TAB. 4.3 – Poids des voisins

d'un et de deux sauts de nc_1

Num_neigh	Poids_neigh
nc_0	2
nc_2	10
nc_5	9
nc_7	10
nc_8	8
nc_3	20
nc_4	8
nc_9	8
nc_{10}	18
nc_6	8
nc_{15}	8

TAB. 4.4 – Voisins à deux sauts de nc_1

Num_neigh	Num_2neigh
nc_0	nc_2
nc_0	nc_3
nc_0	nc_4
nc_0	nc_5
nc_2	nc_0
nc_2	nc_3
nc_2	nc_9
nc_2	nc_{10}
nc_5	nc_0
nc_5	nc_4
nc_5	nc_6
nc_5	nc_{15}

Après la détection du nœud capteur défaillant nf (nommé nc_0 , dans l'exemple de la figure 4.1), le nœud capteur nc_1 entame le processus de remplacement, en exécutant l'algorithme 4 de recherche dans ses tables pour vérifier si ce nœud a des voisins, ou si il est le seul voisin de ce nœud. D'abord il se suppose élu et recherche les voisins du nœud défaillant dans la table 4.4, s'il trouve qu'il n'a pas de voisins alors il se déplace pour remplacer et prendre les fonctions du nœud défaillant, sinon il compare son poids aux poids des voisins de ce nœud défaillant dans la table 4.3, dans ce cas s'il trouve le poids d'un voisin de ce nœud en question supérieur à son poids, alors il met *élu* à faux et se retire du processus de remplacement. Sinon c'est lui l'élu pour le remplacement.

Algorithm 4 repl_fail()

```

1 : élu ← vrai ;
2 : liste ← {} ;
3 : ouvrir (table 4.4) ;
4 : Tant que non fin de fichier (table 4.4) faire
5 :   Si table 4.4.num_neigh =  $nf$  alors
6 :     liste ← liste  $\cup$  table 4.4.num_2neigh ;
7 :   Fin Si ;
8 : Fermer (table 4.4) ;
9 : Si liste  $\neq \emptyset$  alors
10 :   ouvrir (table 4.3) ;
11 :   Tant que non fin de fichier (table 4.3) et (élu = vrai) faire
12 :     Si table 4.3.num_neigh  $\in$  liste alors
13 :       Si table 4.3.poids_neigh > mon_poids alors
14 :         élu ← faux ;
15 :       Fin Si ;
16 :     Fin Si ;
17 :   Fin Tant que ;
18 :   Fermer (table 4.3) ;
19 : Fin Si ;
20 : Si élu = vrai alors
21 :   Se déplacer et assurer les fonctions du nœud capteur défaillant  $nf$  ;
22 :   Si liste_voisin =  $\emptyset$  alors
23 :     Rester un quantum de temps ;
24 :     Retourner à sa place ;
25 :   Fin Si ;
26 : Fin Si ;

```

L'organigramme associé à l'algorithme 4 est représenté dans la figure 4.2.

TAB. 4.5 – Election

Num_neigh	Elu
nc_1	false
nc_2	false
nc_3	true
nc_4	false
nc_5	false

Donc le seul qui sera élu est le nœud capteur nc_3 qui a le poids le plus élevé.

4.3 Evaluation

Nous prenons comme métriques pour l'évaluation la distance parcourue, nous voulons minimiser l'énergie consommée des nœuds exécutant l'algorithme de remplacement, pour la restauration de la connectivité après la détection d'un nœud défaillant. Autrement dit, nous voulons répartir l'énergie, nécessaire pour la restauration de la connectivité, au maximum de nœuds possibles tout en évitant de se déplacer pour l'élection de remplaçant. C'est à dire, prolonger la durée de vie de chaque nœud, ce qui implique la prolongation de la durée de vie du réseau tout entier. La comparaison de notre nouvelle approche *2HTA* avec l'approche *CMWSN : Connectivity Maintenance in the Wireless Sensors Networks* [24] est décrite dans le tableau 4.6

TAB. 4.6 – Comparaison entre l’approche CMWSN et l’approche 2HTA

nœud	CMWSN				2HTA			
	Premier rempla- cement		Deuxième rem- placement		Premier rempla- cement		Deuxième rem- placement	
	Déplacement				Déplacement			
	de $Rc/2$ pour élection	Pour rempla- cement						
nc_1	✓							
nc_2	✓		✓					
nc_3	✓	✓				✓		
nc_4	✓		✓					
nc_5	✓							
nc_6								
nc_7								
nc_8								
nc_9								
nc_{10}								
nc_{11}			✓	✓				✓
nc_{12}			✓					
nc_{13}								
nc_{14}								
nc_{15}								

Hypothèse : la quantité d’énergie consommée pour chaque déplacement est égale à ec . Les deux remplacements dans l’approche CMWSN (remplacement du nœud défaillant nc_0 et du nœud déplacé nc_3) ont coûté, en terme d’énergie consommée, une quantité qui est égale au nombre de déplacements effectués multiplié par ec de l’hypothèse, et sera égal à $9 \times ec$. Mais dans la nouvelle approche proposée 2HTA, les deux remplacements n’ont coûté que $2 \times ec$. Ce taux minime d’énergie consommée dans l’approche 2HTA par rapport à l’approche CMWSN s’explique du fait que dans l’approche 2HTA, l’élection se fait localement, car chaque nœud dispose de toutes les informations nécessaires pour se considérer élu ou non pour remplacer le nœud défaillant.

4.4 Conclusion

Le maintien d'une topologie de nœuds connectés est très difficile dans les applications de réseaux de capteurs. L'échec d'un nœud capteur peut causer la partition du réseau et perturber ainsi l'application assignée au réseau. Autrement dit, certains nœuds peuvent être déconnectés du réseau global. Ce qui implique une perte de connectivité entre les parties de ce dernier. Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement déployés dans des environnements durs et difficiles d'accès où les pannes ou défaillances de nœuds capteurs sont possibles. Ces défaillances de nœuds peuvent nuire à la connectivité du réseau tout entier. Pour répondre à cette perte de connectivité, nous avons proposé une approche de remplacement d'un nœud défaillant en effectuant une chaîne de remplacement suivant un algorithme distribué, en utilisant une table de voisins à deux sauts. Le but principal de cette approche est de restaurer la connectivité du réseau, en exploitant la mobilité des capteurs et en minimisant le taux d'énergie nécessaire pour l'élection et le remplacement du nœud défaillant ou déplacé.

L'idée de la table de voisins à deux sauts évite aux nœuds capteurs, détectant une défaillance de nœud, le déplacement d'une distance de $Rc/2$ pour élire un remplaçant qui se déplacera pour remplacer le nœud défaillant, et les autres retournent à leurs places. Dans notre solution, l'élection se fait localement, chaque nœud a toute l'information pour savoir si c'est lui l'élus ou non. Et gagnera ainsi l'énergie due au déplacement de tous les voisins du nœud défaillant et celle due à l'envoi et la réception de messages pour élire un remplaçant, et aussi l'énergie due au retour à leurs places, des nœuds non élus pour le remplacement. Notre approche 2HTA est une amélioration de l'approche CMWSN, et nous avons montré avec un déroulement d'exemple, qu'elle consomme moins d'énergie pour la restauration de la connectivité que l'approche CMWSN. Nous énoncerons comme perspectives l'évaluation expérimentale de l'approche 2HTA sur un réseau de capteurs de plusieurs nœuds ; Et la comparaison avec d'autres approches connexes.

Les protocoles de routage jouent un rôle très important pour la prolongation de la durée de vie du réseau. Dans le chapitre suivant, nous proposons une approche de routage en tenant compte du maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil.

PROTOCOLE MAX-WEIGHT ET MAINTIEN DE LA CONNECTIVITÉ

5.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de dispositifs pouvant surveiller et collecter des données dans un environnement donné, de les traiter puis de les transmettre vers une station de base, là où se trouve l'application. Assurer la communication directe entre les nœuds capteurs et la station de base force ces derniers à émettre leurs messages avec une puissance élevée [57], et causera ainsi l'épuisement de leur ressource essentielle qui est la batterie. Donc, la collaboration des nœuds pour s'assurer que les nœuds distants communiquent avec la station de base est nécessaire. Ainsi, d'un nœud à un nœud les messages sont propagés, formant une route de plusieurs sauts du nœud émetteur vers la station de base. Le routage est le processus déterminant le chemin entre la source et la destination pour la transmission de données [58].

La durée de vie dans un réseau sans fil, en particulier un réseau de capteurs sans fil, dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité tel que par exemple le manque d'énergie au niveau d'un nœud important. La défaillance d'un nœud capteur laisse une partie ou toute sa zone sans couverture, et peut engendrer l'isolement d'un ou de plusieurs ensembles de nœuds, du réseau tout entier, si c'est un nœud de relais, et dans d'autres cas peut engendrer un échec de la mission assignée au réseau. Etant donné un réseau de capteurs sans fil déployé dans une zone dure et difficile d'accès. Minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs, due à l'acheminement de données vers la station de base, et le partage de l'énergie nécessaire pour accomplir cette tâche est une bonne solution pour retarder la défaillance des nœuds due au manque d'énergie

au niveau de leur batterie, et ainsi prolonger la durée de vie de l'ensemble du réseau. Notre objectif est donc de partager l'énergie totale consommée, pour l'acheminement des données vers la station de base, par plusieurs nœuds, pour minimiser la consommation d'énergie individuelle.

Dans cette partie, nous avons proposé une nouvelle approche [59] pour la prolongation de la durée de vie du réseau, en minimisant l'énergie consommée des nœuds due à l'acheminement des données, pour pouvoir continuer à assurer leurs fonctions de mesure ou d'acheminement des données. Le reste de ce chapitre est organisé comme suit : dans la section 5.2, nous rappelons les travaux antérieures sur le maintien de la connectivité et le routage. La section 5.3 est consacrée à notre contribution, suivi par la section 5.4 qui évalue et montre l'efficacité de l'approche proposée. Enfin, dans la section 5.5, nous concluons le chapitre.

5.2 Maintien de la connectivité et routage

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le cadre du maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons classé les approches trouvées dans la littérature en deux classes : la maintenance curative et la maintenance préventive. Les auteurs de la première classe travaillent sur le maintien de la connectivité en cas de défaillance d'un nœud capteur. Dans [11, 12, 13, 26], les auteurs cherchent à résoudre le problème de connectivité dans le cas du partitionnement du réseau, et/ou le problème de couverture de la zone de surveillance. Tandis que les auteurs de la deuxième classe travaillent pour maintenir le réseau de capteurs connecté le plus longtemps possible, ils cherchent des solutions pour prolonger la durée de vie du réseau en question. A titre d'exemple, les travaux [1, 10, 46, 47] tentent d'utiliser, à un moment donné, un minimum de capteurs assurant la connectivité et/ou la couverture du réseau, les autres capteurs sont mis en mode veille. La solution dans cette deuxième classe peut également être conçue au déploiement du réseau, voir le travail de N. Aitsaadi et al [51], l'objectif de cette solution est de générer la meilleure topologie réseau pour minimiser le coût de déploiement, assurer le maintien de la connectivité et la qualité de la surveillance de la zone de couverture, mais également optimiser la durée de vie du réseau. Toujours dans la deuxième classe, Liao et Wang [52] proposent un protocole MAC asynchrone (AMAC), ils s'attaquent au problème de gaspillage d'énergie et la

synchronisation de temps due au programme de mise en veille échangé dans le cadre du protocole de base PMAC. Les protocoles de routage jouent également un rôle très important pour prolonger la durée de vie du réseau, les chemins de transfert de données sont choisis de manière à ce que la consommation totale d'énergie le long du chemin est réduite [48]. Le routage efficace dans un réseau de capteurs doit minimiser la consommation d'énergie. Pour prolonger la durée de vie du réseau, R.V. Biradar et all dans [22] ont mis en œuvre un protocole de routage multi-sauts, et dans [23] Liu et Wang développent un protocole de routage d'utilisation maximale de l'énergie. Afin de minimiser la dissipation d'énergie et de maximiser la durée de vie du réseau, Chamam et Pierre proposent, dans [49], un nouveau algorithme distribué de clustering où les clusters-head sont élus suivant un message à trois phases échangé entre chaque capteur et ses voisins. Ils démontrent sa supériorité (en termes de durée de vie du réseau et le taux des clusters-head élus) par rapport à EESH, un des algorithmes de clustering les plus récents [50].

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil diffère du routage classique dans les réseaux fixes de différentes manières. Cependant, il n'existe pas d'infrastructure dans les réseaux de capteurs, des liaisons sans fil ne sont pas très fiables, car les nœuds capteurs peuvent échouer, et les protocoles de routage doivent répondre aux exigences essentielles d'économie d'énergie [60]. De nombreux algorithmes de routage ont été développés pour les réseaux sans fil en général. Tous les principaux protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs peuvent être classés en plusieurs catégories. Akkaya et Younis dans [61] présentent une classification des différentes approches, ils les ont divisé en trois catégories principales qui sont : données centrées (data-centric), hiérarchiques et basés sur la localisation (géographiques). Singh et all [62] proposent une classification basée sur sept catégories, comme l'illustre le tableau 5.1.

TAB. 5.1 – Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Catégorie	Protocoles correspondants
Protocoles basés sur la localisation	MECN, SMECN, GAF, GEAR, Span, TBF, BVGF, GeRaF
Protocoles centrés données	SPIN, Directed Diffusion, Rumor Routing, COUGAR, ACQUIRE, EAD, Information-Directed Routing, Gradient-Based Routing, Energy-aware Routing, Information-Directed Routing, Quorum-Based Information Dissemination, Home Agent Based Information Dissemination
Protocoles hiérarchiques	LEACH, PEGASIS, HEED, TEEN, APTEEN
Protocoles basés sur la mobilité	SEAD, TTDD, Joint Mobility and Routing, Data MULES, Dynamic Proxy Tree-Base Data Dissemination
Protocoles basés sur les multi chemins	Sensor-Disjoint Multipath, Braided Multipath, N-to-1 Multipath Discovery
Protocoles basés sur l'hétérogénéité	IDSQ, CADR, CHR
Protocoles basés sur la QoS	SAR, SPEED, Energy-aware routing

5.3 Protocole Max-Weight

Le protocole Max-Weight est un protocole de routage tenant compte de la contrainte énergétique et de la connectivité du réseau, en partageant l'énergie consommée pour router les données recensées d'un nœud capteur donné vers la station de base par plusieurs nœuds. L'idée de partager l'énergie consommée par plusieurs nœuds implique la minimisation de l'énergie consommée individuellement, i.e. prolonger la durée de vie de chaque nœud. Ce qui mène à préserver la connectivité du réseau et prolonger la durée de vie du réseau global.

Notre protocole de routage MWP (Max-Weight Protocol) est décrit dans les étapes suivantes :

1. la transmission de données au *sink* (*station de base*) est accomplie en se basant sur la diffusion d'un message *hello_sink* ;
2. chaque nœud n recevant le message *hello_sink* doit, à son tour, le diffuser (l'envoyé à tous ses voisins sauf à celui qui le lui a envoyé) ;
3. quand le *sink* reçoit le message, il répond en diffusant le message *hello_response* contenant le champ *poids* = 0 ;
4. si un nœud n reçoit un message *hello_response* alors il sauvegarde les informations : source, destination et poids, pour une utilisation ultérieure. Ajoute son identifiant et additionne son poids au champ *poids* puis diffuse le message ;
5. quand le nœud transmetteur du message *hello_sink* reçoit les messages *hello_response* du *sink*, il compare les champs *poids* des messages et sélectionne le chemin qui a le plus grand *poids/nombre de sauts* - 1
6. si l'énergie d'un nœud diminue de telle sorte que son poids change considérablement alors il le recalcule et l'additionne au poids sauvegardé en 4. puis l'envoie dans un message *update*, par le chemin du routage, au nœud transmetteur qui décidera du changement ou non du chemin de routage en temps réel ;
7. si un nœud reçoit un message *update* alors il calcule son poids et l'additionne au poids du message *update* puis l'envoie, par le chemin du routage, au nœud source du routage ;
8. si le nœud transmetteur reçoit le message *update* d'un nœud n au moment du routage alors il revoit son choix du chemin de routage.

Après avoir choisi le chemin de routage, le nœud source commence à envoyer ces données paquet par paquet ; dès que le poids d'un nœud donné, du chemin de routage, diminue, ce dernier envoie un message *update* par le chemin de routage inverse, ce message *update* sera routé (voir l'étape 7) jusqu'à arriver à la source qui décidera du changement ou non du chemin de routage en comparant ce nouveau poids, dans le message *update*, aux poids des chemins de routage enregistrés.

A. Calcul du poids. La formule 5.1 définit le calcul du poids d'un nœud n , en se basant sur le pourcentage de son énergie restante.

$$Poids = \mu \times p \tag{5.1}$$

tels que :

P : est le pourcentage de l'énergie du nœud n ; et

$$\mu = \begin{cases} \alpha & \text{si le \% de son énergie} \geq 50 \\ \beta & \text{si le \% de son énergie} \geq 30 \text{ et } < 50 \\ \gamma & \text{si le \% de son énergie} < 30 \end{cases}$$

α , β , et γ sont des variables expérimentales.

On donne : $\alpha = 1$, $\beta = 3/4$, et $\gamma = 1/2$.

Le principe de fonctionnement est que si le taux d'énergie restant diminue alors le poids du nœud diminue également, ainsi le poids du chemin composant ce nœud diminue aussi. L'idée c'est de maintenir, le plus longtemps possible, le réseau connecté en prolongeant la durée de vie des nœuds capteurs qui ont consommé beaucoup d'énergie (plus de la moitié de l'énergie de leur batterie).

B. Exemple de scénario. Dans l'exemple de la figure 5.1, pour aller du nœud f au nœud a et pour ne pas épuiser le nœud capteur c , le nœud capteur f choisira le chemin 1 ($f - d - b - a$) au lieu du chemin 2 ($f - e - c - a$), et cela en appliquant la méthode proposée, voir comme suit :

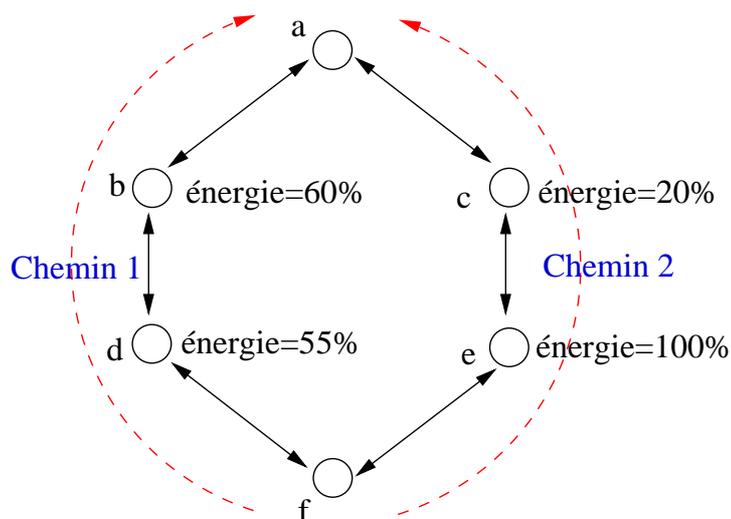


FIG. 5.1 – Exemple de calcul du poids des nœuds capteurs

Chaque nœud calcule son poids, on aura :

- Poids (b) = $1 \times 60 = 60$
- Poids (c) = $1/2 \times 20 = 10$
- Poids (d) = $1 \times 55 = 55$
- Poids (e) = $1 \times 100 = 100$

On a aussi :

- La somme des poids des nœuds du chemin 1 = $55 + 60 = 115$,
- La somme des poids des nœuds du chemin 2 = $100 + 10 = 110$,
- Le nombre de sauts pour les deux chemins est égal à 3,
- Le poids du chemin 1 = $115 / (\text{nombre de sauts} - 1) = 57.5$,
- Le poids du chemin 2 = $110 / (\text{nombre de sauts} - 1) = 55$,

Le nœud capteur f choisira, pour envoyer ses données, le chemin 1 car le *poids* du chemin 1 est supérieur au *poids* du chemin 2.

Le choix tombe bien sur le chemin 1, malgré que dans le chemin 2 il y a le nœud e qui possède toujours la totalité de son énergie, mais le nœud c lui reste juste 20 % de son énergie, alors prolonger la durée de vie de ce nœud revient à prolonger encore la durée de vie du chemin 2 et préserver la redondance de liens entre le nœud f et le nœud a , qui est très importante en terme de connectivité pour prolonger la durée de vie du réseau tout entier.

5.4 Evaluation par un exemple

Pour évaluer notre modèle proposé, nous prenons le réseau illustré dans la figure 5.2, et nous énonçons les hypothèses suivantes :

- Les pourcentages d'énergie des nœuds capteurs de la figure 5.2 sont donnés dans la table 5.2 ;
- Les distances entre les nœuds sont égales ;
- Chaque envoi et réception de 100 paquets consomme une unité d'énergie durant une unité de temps (seconde) ;
- S est le nœud source et D est le nœud destination.

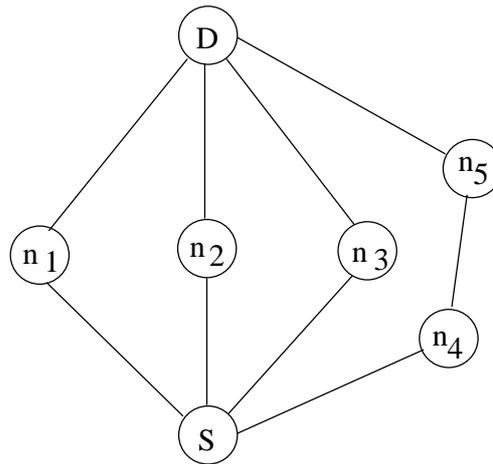


FIG. 5.2 – Exemple de réseau

TAB. 5.2 – Pourcentages d'énergie des nœuds capteurs situés entre les nœuds S et D

Nœud	%_énergie
n_1	80
n_2	100
n_3	90
n_4	100
n_5	100

Le processus s'arrête lorsqu'un nœud consomme la totalité de son énergie.

A- En utilisant notre protocole Max-Weight (Table 5.3).

Nous définissons la notation suivante :

- P : Poids
- N_S : Nombre de sauts
- P_E : Paquets envoyés
- T_E_C : Taux d'énergie consommé
- T_E_R : Taux d'énergie restant
- N_P : Nouveau poids
- T : Temps

TAB. 5.3 – Détails de transfert de données entre les nœuds S et D

Chemin	P	N_S	P_E	T_E_C	T_E_R	N_P	T
$S_{n_2}_D$	100	2	5100	51	49	36.75	51
$S_{n_4}_{n_5}_D$	100	3	5100	102	98	36.75	102
$S_{n_3}_D$	90	2	4100	41	49	36.75	41
$S_{n_1}_D$	80	2	3100	31	49	36.75	31
$S_{n_1}_D$	36.75	2	2000	20	29	14.5	20
$S_{n_2}_D$	36.75	2	2000	20	29	14.5	20
$S_{n_3}_D$	36.75	2	2000	20	29	14.5	20
$S_{n_4}_{n_5}_D$	36.75	3	2000	40	58	14.5	40
$S_{n_1}_D$	14.5	2	2900	29	0	0	29

Le nombre total de paquets de données envoyés du nœud source S au nœud destinataire D est égal à 28300 paquets, avant que le premier nœud tombe en panne. Le temps nécessaire pour l'envoi de ces paquets est de 354 unités de temps (sec).

B- Les résultats pour chaque chemin pris sans l'update (Table 5.4).

TAB. 5.4 – Détails de transfert de données entre les nœuds S et D pour chaque chemin

Chemin	P	N_S	P_E	T_E_C	T_E_R	N_P	T
$S_{n_2}_D$	100	2	10000	100	0	0	100
$S_{n_4}_{n_5}_D$	100	3	10000	200	0	0	200
$S_{n_3}_D$	90	2	9000	90	0	0	90
$S_{n_1}_D$	80	2	8000	80	0	0	80

Le nombre maximal de paquets de données envoyés du nœud source S au nœud destinataire D sans mettre à jour le chemin de routage durant l'envoi est égal à 10000, avant que le premier nœud tombe en panne.

La table 5.5 montre un récapitulatif des résultats obtenus dans les tables 5.3 et 5.4 :

TAB. 5.5 – Récapitulatif des résultats obtenus

Chemin	Nombre de paquets envoyés	Temps
Max-Weight Protocol	28300	354
Chemin unique durant le transfert de données		
$S_{n_2}D$	10000	100
$S_{n_4n_5}D$	10000	200
$S_{n_3}D$	9000	90
$S_{n_1}D$	8000	80

Nous remarquons que le rapport entre le nombre de paquets envoyés et le temps écoulé avant que le premier nœud tombe en panne est plus meilleur avec le protocole Max-Weight qu'avec n'importe lequel des autres chemins, ceci renforce notre solution en terme de connectivité et de la durée de vie du réseau global.

Etant données les hypothèses suivantes :

- Nombre de nœuds = 100
- Energie des nœuds = 100 unités
- Energie de transmission/réception d'un paquet de données = 1 mu
- Durant la simulation, la source et la destination du routage sont les mêmes. Le processus s'arrête lorsqu'un nœud consomme la totalité de son énergie.

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6.

La figure 5.3 illustre le nombre de paquets envoyés suivant le taux d'énergie consommée de notre approche avec l'approche classique (sans mise à jour).

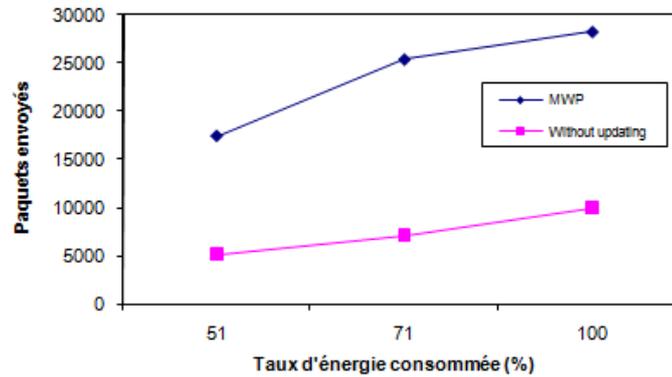


FIG. 5.3 – Nombre de paquets envoyés suivant le taux d'énergie consommée

Nous remarquons dans la figure 5.3 que le nombre de paquets envoyés, en utilisant la mise à jour de route, durant le routage (notre protocole Max-Weight) est beaucoup plus grand que sans la mise à jour de route durant le routage avec n'importe laquelle route utilisée parmi toutes les routes existantes, et cela pour le même pourcentage d'énergie consommée. La différence du nombre de paquets envoyés en fonction du taux d'énergie consommée entre les deux approches est illustrée dans la figure 5.4.

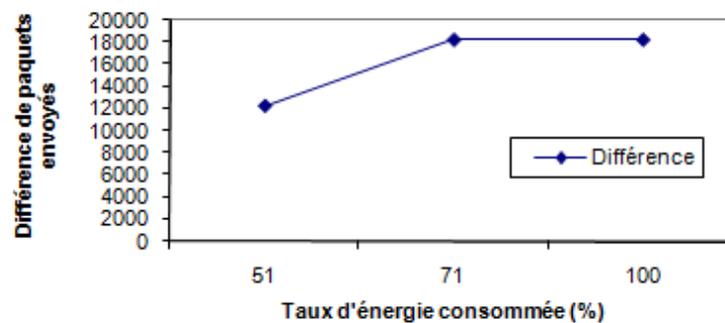


FIG. 5.4 – Différence de paquets envoyés avant la défaillance du premier nœud entre les approches de routage avec et sans mise à jour en fonction du taux d'énergie consommée.

La figure 5.5 illustre la comparaison du temps écoulé avant la défaillance du premier nœud en fonction du taux d'énergie consommée pour notre approche et l'approche classique (sans mise à jour).

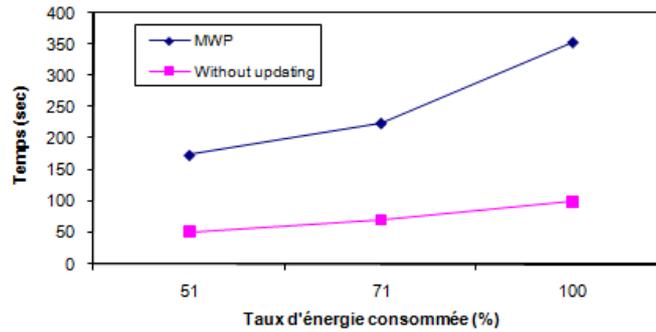


FIG. 5.5 – Temps écoulé avant la défaillance du premier nœud en fonction du taux d'énergie consommée.

La figure 5.5 montre que le temps écoulé avant la défaillance du premier nœud, en utilisant la mise à jour de route durant le routage (notre protocole Max-Weight), dépasse le temps écoulé avant la défaillance du premier nœud avec l'approche sans mise à jour de route durant le routage quelque soit la route utilisée, pour le même taux d'énergie consommée. La différence de temps avant la défaillance du premier nœud entre les deux approches est illustrée dans la figure 5.6.

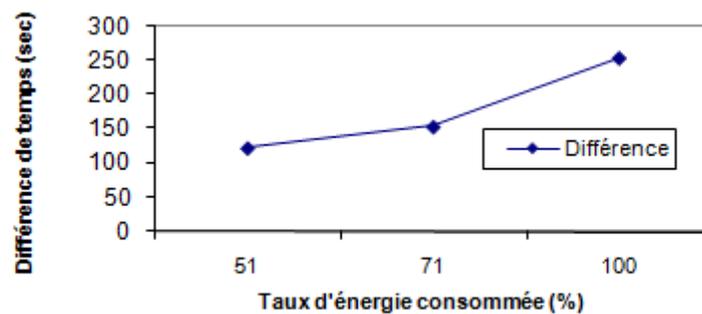


FIG. 5.6 – Différence de temps avant la défaillance du premier nœud entre les deux approches, avec et sans mise à jour de route, en fonction du taux d'énergie consommée.

Cela explique que la nouvelle approche permet de prolonger la durée de vie du réseau, et permet également de favoriser pour le routage les nœuds ayant beaucoup d'énergie restante que ceux qui ont consommé plus de leur énergie pour les garder en fonctionnement, afin de ne pas perdre des liens de connexion entre les nœuds. Garder le réseau avec plus de liens signifie avoir plus de chemins pour le routage.

5.5 Conclusion

Le maintien d'une topologie inter-nœuds connectée est très important dans les applications de réseaux de capteurs. Une défaillance d'un nœud du réseau peut provoquer le partitionnement du réseau et perturber ainsi l'application assignée au réseau. En d'autres termes, certains nœuds peuvent être déconnectés du réseau global. En conséquence, les parties isolées seront déconnectées. Les réseaux de capteurs sans fil sont, généralement, déployés dans des environnements difficiles d'accès où les pannes ou défaillances de nœuds capteurs sont possibles. Ces défaillances peuvent nuire à la connectivité de l'ensemble du réseau. Assurer une communication directe entre les nœuds capteurs et la station de base consomme beaucoup d'énergie et provoque ainsi l'épuisement de leur ressource essentielle qui est la batterie. Par conséquent, la coopération des nœuds pour assurer la communication des nœuds distants avec la station de base est nécessaire. Ainsi, les messages sont propagés d'un nœud à un autre, formant ainsi un trajet multi-sauts depuis le nœud source jusqu'à la station de base.

Dans cette partie, nous avons proposé une approche de routage pour les réseaux de capteurs sans fil, en tenant compte du maintien de la connectivité. Chaque nœud contient un poids calculé en fonction de son taux d'énergie restant. Durant le routage, si le nœud transmetteur reçoit un message de mise à jour (*update-message*), d'un nœud participant au routage, alors il réexamine son choix de chemin de routage, en comparant le poids du chemin de routage dans *update-message* avec les poids des chemins de routage enregistrés. L'évaluation de l'approche proposée montre que les résultats sont satisfaisants. Dans le protocole de routage proposé, les nœuds capteurs consomment moins d'énergie. Les valeurs optimisées de α , β et γ dans la formule 5.1 est un problème important qui sera discuté dans nos futurs travaux.

Conclusion Générale & perspectives

DANS ce document, nous avons classifié et étudié les approches trouvées dans la littérature portant sur le maintien de la connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons ensuite proposé des solutions pour remédier aux problèmes de partitionnement du réseau et de la prolongation de la durée de vie du réseau. Le routage peut être utilisé pour maintenir le réseau connecté le plus longtemps possible en réduisant le taux d'énergie nécessaire pour l'acheminement des données, une solution générique pouvant être testée et utilisée dans tous les protocoles de routage a été proposée et évaluée.

La première solution proposée dans [26], appelée *DRFN*, est une approche de détection et de remplacement d'un nœud défaillant dans le cas du partitionnement du réseau. Elle est basée sur deux algorithmes : le premier consiste à détecter le nœud défaillant, en se basant sur un laps de temps prédéfini ; Après chaque laps de temps, le nœud qui ne répond pas est considéré défaillant. Le second algorithme consiste à remplacer le nœud défaillant détecté en effectuant une chaîne de remplacement suivant un algorithme distribué. Le but principal de cette approche est de restaurer la connectivité du réseau en exploitant la mobilité des capteurs, en tenant compte de la contrainte d'énergie. L'idée est de partager la consommation d'énergie, nécessaire à la restauration de la connectivité, avec plusieurs capteurs pour minimiser les défaillances précoces des nœuds capteurs, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau global. Les résultats de l'évaluation de notre approche *DRFN* avec l'approche connexe *C³R* montrent que durant la même période de temps, le taux d'énergie consommée avec l'approche *DRFN* est inférieur au taux d'énergie consommée avec l'approche *C³R*. Et ce taux d'énergie consommée avec l'approche *DRFN* est partagé par plus de nœuds qu'avec l'approche *C³R*. Ce qui explique que la quantité d'énergie individuelle consommée par les nœuds capteurs dans notre approche *DRFN* est beaucoup plus

petite que dans l'approche C^3R . Par rapport à la couverture du réseau, avec notre approche $DRFN$, le pourcentage de réduction du champs de couverture est moins élevé que dans l'approche connexe C^3R . Nous dirons que notre approche contribue efficacement à prolonger la durée de vie du réseau.

La deuxième solution [25], appelée $2HTA$, est aussi classée dans les solutions pour le problème de connectivité en cas du partitionnement du réseau causé par une défaillance de nœuds, cette solution utilise une table de voisins à deux sauts pour restaurer la connectivité du réseau, en effectuant une chaîne de remplacements suivant un algorithme distribué. L'objectif visé est de minimiser l'énergie totale consommée, nécessaire pour la restauration de la connectivité, et ainsi prolonger la durée de vie du réseau. L'idée de la table à deux sauts évite aux nœuds capteurs, détectant une défaillance de nœud, le déplacement d'une distance de $Rc/2$ pour élire un remplaçant qui se déplacera pour remplacer le nœud défaillant, et les autres retournent à leurs places. Dans cette solution, l'élection se fait localement. Chaque nœud a toute l'information pour savoir si c'est lui l' élu ou non ; Et gagnera ainsi l'énergie due au déplacement de tous les voisins du nœud défaillant et celle due à l'envoi et la réception des messages pour élire un remplaçant et aussi l'énergie due au retour des nœuds non élus, pour le remplacement, à leurs places. Notre approche $2HTA$ est une amélioration de l'approche $CMWSN$ [24], et nous avons montré avec un déroulement d'exemple, qu'elle consomme moins d'énergie pour la restauration de la connectivité.

Une troisième contribution au problème de connectivité, que nous classons dans le maintien de la connectivité préventif, porte sur le routage. L'approche proposée [59] est une approche générique de routage, qui peut être testée et utilisée dans plusieurs protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Le principe est que chaque nœud contient un poids calculé en fonction de son taux d'énergie restant, et durant le processus de routage, si le nœud transmetteur reçoit un message *update* d'un nœud participant au routage alors il revoit son choix du chemin de routage, par la comparaison du poids du chemin de routage dans le message *update* avec les poids des chemins de routage enregistrés. Un déroulement d'exemple et une simulation montrent l'efficacité de l'approche proposée.

Les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste. Ils ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans le domaine de maintien de la connectivité afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles. Car en cas de partitionnement du réseau, la solution la plus évidente est le remplacement manuel du nœud défaillant, ce qui n'est pas pratique du fait que le réseau de capteurs peut être déployé dans une zone dure et difficile d'accès. Alors la solution la plus adaptée à ce type de réseau est que les nœuds du réseau doivent s'auto-organiser pour élire un remplaçant, pour cela la mobilité est une hypothèse à ne pas écartée dans toutes les solutions en cas de partitionnement.

Enfin, nous rappelons les perspectives de recherche que nous avons énoncé dans les conclusions de nos contributions, et nous les citons dans les points suivants :

- Optimisation des valeurs de α et β dans la formule 3.1 qui est un problème important pour la définition des poids des nœuds capteurs ;
- Tenir compte des nœuds capteurs redondants pour la restauration de la connectivité ;
- Evaluation expérimentale de l'approche *2HTA* sur un réseau de capteurs de plusieurs nœuds, et la comparaison avec d'autres approches connexes ;
- Optimisation de α , β et γ dans la formule 5.1 qui est un problème très important pour la recherche et la mise à jour du chemin de routage.

Bibliographie

- [1] H. Zhang and J. C. Hou, *Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks*, Ad Hoc and Sensor Wireless Networks journal (AHSWN), 1(1-2), (2005), pp. 89-124.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, *Wireless sensor network survey*, In Computer Networks, 52(12), (2008), pp. 2292-2330.
- [3] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless sensor networks : a survey*, In journal of Computer Networks, vol.38, pp. 393-422, 2002.
- [4] A. Boukerche, R. Pazzi, and R. Araujo, *A supporting protocol to periodic, event-driven and query-based application scenarios for critical conditions surveillance*, In First International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (ALGOSENSORS), Springer-Verlag(2004) 137-146 Lecture Notes on Computer Science, LNCS 3121.
- [5] Bein Doina, *Self-configuring, self-organizing, and self-healing schemes in wireless sensor networks*, In Misra Sudip, Woungang Isaac, Misra Subhas C, editors. Guide to Wireless Ad Hoc Networks, Computer Communications and Networks, London : Springer-Verlag, pp. 293-304, 2009.
- [6] Chen Benjie, Jamieson Kyle, Balakrishnan Hari, and Morris Robert, *Span : an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks*, ACM Wireless Networks Journal, 8(5), pp. 481-494, 2002.
- [7] R. Krishnan, and D. Starobinski, *Message-efficient self-organization of wireless sensor networks*, IEEE WCNC, New Orleans, 2003, pp. 1603-1608.
- [8] S. Misra and A. Jain, *Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks*, Journal of Network and Computer Applications, 34(2011), pp. 1530-1544.
- [9] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A Wang and A Chandrakasan, *Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor*

-
- networks*, In Proceedings of MobiCom'01, 7th annual international conference on Mobile computing and networking, Rome, Italy, July 2001, pp. 272-286.
- [10] F. Ye, G. Zhong, S. Lu and L. Zhang, *Peas : A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks*, In The 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Providence Rhode Island, 2003.
- [11] Ameer Ahmed Abbasi, Mohamed Younis, and Kemal Akkaya, *Movement-Assisted Connectivity Restoration in Wireless Sensor and Actor Networks*, In IEEE Transactions on parallel and distributed systems, 20(9), pp. 1366-1379, 2009.
- [12] N. Tamboli, and M. Younis, *Coverage-aware connectivity restoration in mobile sensor networks*, Journal of Network and Computer Applications, 33(4), (2010), pp. 363-374.
- [13] A. Zamanifar, O. Kashefi and M. Sharifi, *AOM : An efficient approach to restore actor-actor connectivity in wireless sensor and actor networks*, In International Journal of Computer Networks & Communications, 1(1), (2009), pp. 61-72.
- [14] Christian Bettstetter, *On the Connectivity of Ad Hoc Networks*, in the Computer Journal, Vol. 47 No. 4, pp. 432-447, 2004.
- [15] J. Joy Winston and B. Paramasivan, *A Survey on Connectivity Maintenance and Preserving Coverage for Wireless Sensor Networks*, International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks (IJRRWSN), Vol. 1, No. 2, ISSN : 2047-0037, pp.11-18, June 2011.
- [16] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, *Directed Diffusion : A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks*, in Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), ACM, New York, USA, pp. 56-67, 2000.
- [17] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, *Wireless Integrated Network Sensors*, Commun. ACM, vol. 43, no. 5, pp. 51-58, May 2000.
- [18] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, *Next Century Challenges : Mobile Networking for Smart Dust*, Proc. ACM MobiCom'99, Washington, DC, pp. 271-78, 1999.
- [19] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, *Guest Editors' Introduction : Overview of Sensor Networks*, Computer, vol.37, no. 83, pp. 41-49, Aug. 2004.

-
- [20] Mehmet R. Yuce, Steven W. P. Ng, Naung L. Myo, Jamil Y. Khan, Wentai Liu, *Wireless Body Sensor Network Using Medical Implant Band*, Journal of Medical Systems, vol. 31, no. 6, pp. 467-474, 2007.
- [21] Ana-Belen Garcia-Hernando, Jose-Fernan Martinez-Ortega, Juan-Manuel Lopez-Navarro, Aggeliki Prayati, and Luis Redondo-López, *Problem Solving for Wireless Sensor Networks*, Series : Computer Communications and Networks, ISBN-10 : 1848002025, ISBN-13 : 978-1848002029, Springer, 2008.
- [22] R.V. Biradar, S. R. Sawant, R. R. Mudholkar, and V.C .Patil, *Multihop Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks*, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 1, pp. 155-164, January 2011.
- [23] Y. Liu, Z. Wang, *Maximizing energy utilization routing scheme in wireless sensor networks based on minimum hops algorithm*, Computers and Electrical Engineering, Vol. 38, Issue 3, PP. 703-721, 2012.
- [24] AbdelMalek Boudries, and Makhoulf Aliouat, *Connectivity maintenance in the wireless sensors networks : Detection and replacement of a failing node*, 2nd International Congress on Telecommunication and Application, ICTA'2012. April 11-12, 2012. Bejaia, Algeria.
- [25] AbdelMalek Boudries, Makhoulf Aliouat, and Mourad Amad, *Replacement approach of a failing node for the connectivity maintenance in the wireless sensors networks by using two hops neighbors table*, International Workshop on Performance Evaluation and Quality of Service EPQoS'2013, ISBN 978-9931-9140-0-6, pp. 153-158, Mai 05-06, 2013. Bejaia, Algeria.
- [26] Abdelmalek Boudries, Makhoulf Aliouat, Patrick Siarry, *Detection and replacement of a failing node in the wireless sensors networks*, In Computer and Electrical Engineering Journal, vol. 40, issue 2, 2014, PP. 421-432.
- [27] HY Kung, JS Hua, CT Chen, *Drought forecast model and framework using wireless sensor networks*, Journal of Information Science Engineering, 22(4), 2006, pp. 751-769.
- [28] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, J.Anderson, *Wireless sensor networks for habitat monitoring*, Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, Atlanta, Georgia, USA, September 2002.

-
- [29] B. Lo, S. Thiemjarus, R. King and G. Z. Yang, *Body sensor network-a wireless sensor platform for pervasive healthcare monitoring*, In Adjunct Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Computing, May 2005.
- [30] P. S. Pandian, K. P. Safeer, Pragati Gupta, D. T. Shakunthala, B. S. Sundershesu, and V. C. Padaki, *Wireless sensor network for wearable physiological monitoring*, Journal of networks, 3(5), pp. 21-29, 2008.
- [31] Mehmet R. Yuce, Peng Choong Ng, and Jamil Y. Khan, *Monitoring of Physiological Parameters from Multiple Patients Using Wireless Sensor Network*, Journal of Medical Systems, vol. 32, no. 5, pp. 433-441, 2008.
- [32] Tia Gao, Dan Greenspan, Matt Welsh, Radford R. Juang, and Alex Alm, *Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network*, in Proceedings of the 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS), pp. 102-105, 2005.
- [33] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 802.15.1-2005, Part 15.1 : Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)*, 4 June 2005.
- [34] Jin Shyan Lee, Yu-Wei Su, and Cung-Chou Shen, *A Comparative Study of Wireless Protocols : Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*. In Proceeding of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, pp. 46-51 , Novembre 2007.
- [35] Yi-Hsien Tseng, Eric Hsiao-kuang Wu and Gen-Huey Chen, *Scene-change aware dynamic bandwidth allocation for real-time VBR video transmission Over IEEE 802.15.3 wireless home networks*, IEEE Trans. Multimedia, vol. 9, no. 3, pp.642-654, 2007.
- [36] Yi-Hsien Tseng, Eric Hsiao-kuang Wu and Gen-Huey Chen, *Maximum Traffic Scheduling and Capacity Analysis for IEEE 802.15.3 High Data Rate MAC Protocol*, Proc. of IEEE VTC 2003-Fall, Lake Buena Vista, FL, USA, vol. 3, pp. 1678-1682, Oct. 2003.
- [37] Geoff Mulligan, *The 6LoWPAN architecture*, Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors (EmNets'07), ACM, New York, USA, PP. 78-82, 2007, DOI=10.1145/1278972.1278992, <http://doi.acm.org/10.1145/1278972.1278992>.

-
- [38] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 802.15.4-2006, Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 8 September 2006.
- [39] Zubair Md. Fadlullah, Mostafa M. Fouda, Nei Kato, Akira Takeuchi, Noboru Iwasaki, and Yousuke Nozaki, *Toward Intelligent Machine-to-Machine Communications in Smart Grid*, IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 4, pp. 60 - 65, April 2011.
- [40] E. Y. Song, K. Lee, *Understanding IEEE 1451 - Networked smart transducer interface standard*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol.11, No. 2, pp.11-17, 2008.
- [41] Kang Lee, *A synopsis of the IEEE P1451 - standards for smart transducer communication*, National Institute of Standards and Technology, 1999. ieee1451.nist.gov/1451synosis-599F.pdf, Accessed 06 Mai 2014.
- [42] Muhammad Omer Farooq and Thomas Kunz, *Operating Systems for Wireless Sensor Networks : A Survey*, In Sensors Journal, vol.11, pp. 5900-5930, 2011.
- [43] A. Savvides, C. C. Han, and M. B. Srivastava, *Dynamic fine-grained localization in ad hoc networks of sensors*, in Proceedings of ACM MOBICom and Networking, Rome, Italy, pp.166-179, July 2001.
- [44] A. Woo, D. Culler, *A transmission control scheme for media access in sensor networks*, in Proceedings of ACM MobiCom'01, Rome, Italy, pp. 221-235, July 2001.
- [45] Ji Li, Lachlan L.H. Andrew, Chuan Heng Foh, Moshe Zukerman and Hsiao-Hwa Chen, *Connectivity, Coverage and Placement in Wireless Sensor Networks*, Sensors 9, no 10, pp. 7664-7693, 2009.
- [46] A. Makhoul, R. Saadi, and C. Pham, *Surveillance vidéo sur réseaux de capteurs sans-fils : ordonnancement adaptatif avec prise en compte de la criticité*, In CFIP (Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles), Strasbourg, France, 2009.
- [47] D. Tian and N. D. Georganas, *A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks*, In First ACM International workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), Georgia, USA, 2002, pp. 32-41.

-
- [48] V. Kumar, S. Jain, and S. Tiwari, *Energy Efficient Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks : A Survey*, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 5, No 2, September 2011, pp. 259-268.
- [49] A. Chamam, S. Pierre, *A distributed energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks*, Computers and Electrical Engineering 36, pp. 303-312, 2010.
- [50] I. Woungang, *Wireless ad hoc, sensor and mesh networks*, Computers and Electrical Engineering 36 (2010) 259-260.
- [51] Nadjib Aitsaadi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta, Guy Pujolle, *Artificial potential field approach in WSN deployment : Cost, QoM, connectivity, and lifetime constraints*, In journal of Computer Networks, 55(1), pp. 84-105, 2011.
- [52] Wen-Hwa Liao, and Hsiao-Hsien Wang, *An asynchronous MAC protocol for wireless sensor networks*, In Journal of Network and Computer Applications, 31(2008), pp. 807-820
- [53] G. Wang, G. Cao, T. La Porta, and W. Zhang, *Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks*, in the Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of IEEE Computer Communications Societies (INFOCOM'05), Miami, FL, March 2005.
- [54] M. Jorgic, I. Stojmenovic, M. Hauspie, and D. Simplot-ryl, *Localized algorithms for detection of critical nodes and links for connectivity in ad hoc networks*, Proceedings of the 3rd Annual IFIP Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Turkey, 2004, pp. 360-371.
- [55] F. Dai, and J. Wu, *An Extended Localized Algorithm for Connected Dominating Set Formation in Ad Hoc Wireless Networks*, IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, 15(10), pp. 908-920, 2004.
- [56] Guohong Cao and Mukesh Singhal, *A Delay-Optimal Quorum-Based Mutual Exclusion Algorithm for Distributed Systems*, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 12, no. 12, pp. 1256-1268, 2001.
- [57] L. J. G. Villalba, A. L. S. Orozco, A. T. Cabrera and C. J. B. Abbas, *Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*, Sensors 2009, 9, 8399-8421, doi :10.3390/s91108399, ISSN 1424-8220.
- [58] P. Kumar, M.P.Singh and U.S.Triar, *A Review of Routing Protocols in Wireless Sensor Network*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN : 2278-0181, Vol. 1 Issue 4, June 2012.

-
- [59] AbdelMalek Boudries, Makhlouf Aliouat, Mourad Amad, Abderrahmane Baadache, *Max-Weight Protocol for connectivity maintenance in wireless sensor network*, 3rd International Congress on Telecommunication and Application, ICTA'2014. April 23-24, 2014. Bejaia, Algeria.
- [60] H. Frey, S. Ruhrup, and I. Stojmenovic, *Routing in wireless sensor networks*, S. Misra et al. (eds.), Guide to Wireless Ad Hoc Networks 4, 81-111 (2009); Computer Communications and Networks, DOI : 10.1007/978-1-84882-218-4 4, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [61] Kemal Akkaya, Mohamed Younis, *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*, Ad Hoc Networks 3 (2005) 325-349.
- [62] Shio Kumar Singh, M P Singh, and D K Singh, *Routing Protocols in Wireless Sensor Networks - A Survey*, International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES) Vol.1, No.2, pp.63-83, November 2010.

Résumé

La durée de vie dans un réseau sans fil, en particulier un réseau de capteurs sans fil dépend fortement du facteur connectivité entre ses nœuds. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine d'une rupture de connectivité tels que : le manque d'énergie au niveau d'un nœud important, infection d'un nœud vital par un code malveillant, une défaillance logique ou physique d'un nœud primaire etc. Cette rupture peut conduire dans certains cas à une reconfiguration du réseau en engendrant ainsi un overhead préjudiciable ou dans d'autres cas à un échec de la mission assignée au réseau. Dans cette thèse, nous avons proposé trois approches portant sur le maintien de la connectivité pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans fil.

Mots clés : Connectivité, Couverture, Réseaux de capteurs, Défaillance.

Abstract

The lifetime in a wireless network, in particular a wireless sensors network depends strongly on the factor connectivity between its nodes. Several factors can be at the origin of a connectivity rupture such as: lack of energy on a significant node level, infection of a vital node by a malevolent code, a logical or physical failure of a primary node, etc. This rupture can lead in some cases to a reconfiguration of the network by generating a prejudicial overhead or in other cases to a failure of the mission assigned to the network. In this thesis, we propose three approaches relating to the connectivity maintenance to prolong the lifetime of the wireless sensor networks.

Keywords : Connectivity, Coverage, Sensors networks, Failure node.

ملخص

عمر شبكة لاسلكية، بالأخص شبكة أجهزة الاستشعار اللاسلكية تعتمد بقوة على عامل الارتباط بين عقدها. يمكن أن تكون هناك عدة عوامل تسبب فشل الاتصال مثل نقص الطاقة في عقدة مهمة، أو عدوى لعقدة حيوية بالشفرة الخبيثة، أو الفشل المادي أو المنطقي لعقدة أساسية... الخ. هذا الكسر للروابط يمكن أن يؤدي في بعض الحالات إلى إعادة تشكيل الشبكة وبالتالي توليد النفقات الضارة عامة أو في حالات أخرى إلى فشل المهمة المسندة إلى الشبكة. في هذه الأطروحة، اقترحنا ثلاثة نهج للحفاظ على الاتصال لتمديد عمر شبكة الاستشعار اللاسلكية.

الكلمات المفتاحية : ارتباط، تغطية، شبكات الاستشعار، فشل عقدة.
