

:23

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaia

Faculté des Sciences Exactes

Département Informatique



Mémoire de Fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master recherche en Informatique

Spécialité : Réseaux et système Distribués

THÈME

Protocole de clustering pour le maintien de la
couverture dans les reseaux de capteurs sans
fils

Réalisé par

M^{elle} OUADA Farah Sarah & M^{elle} OUGUIGUI Sihem

Devant le jury composé de

Présidente M ^r FARAH Zobeyr	M A A	Université A.Mira Bejaia
Rapporteur M ^r KHANOUCHE M.Essaid	M A B	Université A.Mira Bejaia
Examineur M ^r MIR Foudil	M A A	Université A.Mira Bejaia
Examinatrice M ^{lle} TIAB Amel	Doctorante	Université A.Mira Bejaia

PROMOTION 2012



remerciment

Nous tenons à remercier le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience jusqu'à l'achèvement de ce modeste travail.

Nous exprimons nos remerciements à notre encadreur Mr KHANOUCHE Mouhamed Essaid pour l'assistance qu'il nous a témoigné, pour sa disponibilité, pour ces orientations et conseils sans lesquels ce travail n'aurait pas vu le jour, qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude.

Nous remercions tous particulièrement les membres de jury qui ont accepté de juger notre travail, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Un merci pudique : à nos familles, pour leur soutien qui nous a poussé à chercher au fond de nous la volonté de faire toujours beaucoup plus.

Enfin, nous remercions tous nos collègues en Master 2 ainsi nos amis qui nous ont soutenu et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.



dedicaces

A nos très chers parents On vous doit ce qu'on est aujourd'hui grâce à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite reconnaissance envers ce que vous avez fait pour nous.

A BILEL, SOFIANE, LILA ET MELISSA.

Toutes nos familles. Tous nos ami(e)s.



Liste des Abréviations

RCSFs	Réseau de Capteurs Sans Fils.
WPAN	Wireless Personnel Area Network.
WLAN	Wireless local Area Network.
WMAN	Wireless Métropolitain Area Network.
BLR	Boucle Locale Radio.
WI-FI	Wireless Fidelity.
WWAN	Wireless Wide Area Network.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
GSM	Global System for Mobile Communication.
GPRS	General Paquet Radio Service.
GPS	Global Position System
UMTS	Universal Mobile Télécommunication System.
AP	Access Point.
MANET	Mobile Ad hoc NETWORK
CPU	Central Processing Unit.
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
WASP	Wirelessly Accessible Sensor Populations.
SVP	SurVeiller et Prévenir.
RFID	Radio Frequency IDentification.
MAC	Media Access Control.
PDA	Personal Digital Assistant.
RCap	Rayon de Capture.
RCom	Rayon de Communication.
TTS	Two-Tiered Scheduling.
EDM	Ensemble Dominant Minimum.
QoS	Quality of Service.
1 CP	1 Coverage Preserving Protocol.
SCOM	Scalable Coverage Maintenance.
DEECIC	Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
ECCoM	Energy-aware Clustering Covrage Maintenance



Résumé

Grâce aux progrès récents dans le domaine de la micro-électronique et l'émergence des technologies de communication sans fil, les réseaux de capteurs ont vu le jour. Par ailleurs, l'un des problèmes majeurs de ce type de réseaux, est la couverture dont l'objectif est d'observer efficacement une zone géographique. Pour résoudre ce problème, plusieurs protocoles utilisent l'ordonnancement d'activité qui consiste à mettre dans l'état passif les capteurs redondants, tout en maintenant la couverture par les noeuds qui restent actifs. Dans ce travail, nous proposons un protocole hiérarchique basé sur le clustering pour le maintien de la couverture, nommé ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance). Il divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité, durant chaque période un ensemble de clusters est formé. Un nombre minimum de membre actifs des clusters est sélectionné pour assurer la couverture. La sélection des capteurs est basée sur le calcul d'un temps d'attente dépendant principalement de l'énergie résiduelle et du degré des capteurs. La simulation a montré que les résultats fournis par ECCoM sont très compétitifs, et ce en préservant une couverture quasi-totale avec un nombre réduit de capteurs, ajoutant à ceci un équilibrage de la charges de travail entre les capteurs.

Mots Clés : Réseaux de capteurs sans fil, couverture, clustering, ordonnancement d'activité, équilibrage de charges.



Abstract

Thanks to the recent developments in micro-electronics technologies and wireless communications, the sensor networks have emerged. Moreover, one of the major problems of such networks is the coverage that consists in observing continuously and effectively a geographical area. To solve this problem, several protocols use the sensor activity scheduling mechanism that consists on turning off redundant sensors while maintaining coverage by the remaining active nodes. In this work, we suggest a hierarchical protocol based on the clustering that maintains the coverage, named ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance). It divides the networks lifetime to activity rounds, during each round a set of clusters is formed. A minimum of active member of cluster is selected to ensure coverage. The selection of the sensors is based on the calculation of a timeout depending mainly on the residual energy and degree of nodes. Simulation showed that the results provided by ECCoM are very competitive by preserving a quasi-total coverage with a reduced number of sensors, adding to this, a load balancing between sensors.

Keywords :Wireless Sensor Networks, Coverage, Clustering, Activity scheduling, Load balancing.



Table des matières

remerciment	i
dedicaces	ii
liste des Abréviations	iii
table des matières	viii
Introduction Générale	1
1 Présentation des réseaux sans fil et réseaux de capteurs	4
1.1 introduction	4
1.2 Les réseaux sans fil et Ad hoc	5
1.2.1 Les réseaux sans fil	5
1.2.2 Présentation des réseaux Ad hoc	7
1.3 Les réseaux de capteurs sans fil	8
1.3.1 Le micro capteur, définition et architecture	8
1.3.2 Types de capteur	11
1.3.3 Architecture d'un RCSF	11
1.3.4 Les domaines d'applications des RCSFs	12
1.3.5 Exemples de projets autour des réseaux de capteurs	14
1.3.6 Les contraintes de conception des RCSFs	15
1.3.7 Différentes problématiques dans les réseaux de capteurs	17

1.4	Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc mobiles	18
1.4.1	Les similitudes entre les RCSFs et MANets	18
1.4.2	Les différences entre les MANets et les RCSFs	18
1.5	Etude du problème de la couverture dans les RCSFs	19
1.5.1	zone de surveillance d'un capteur	20
1.5.2	Surface couverte par un réseau de capteur	20
1.5.3	Les différentes formulations du problème de la couverture	21
1.5.4	Les types de couverture	22
1.5.5	Relation entre la couverture de points et la couverture de zone	23
1.5.6	La couverture simple et la couverture multiple	24
1.6	L'ordonnancement d'activité	24
1.6.1	Gestion de l'ordonnancement	25
1.7	Conclusion	27
2	Etude de quelques protocoles de couverture de surface	28
2.1	Introduction	28
2.2	Etude de quelques protocoles de couverture	28
2.2.1	Les protocoles centralisés	29
2.2.2	Les protocoles distribués	35
2.2.3	Les protocoles hiérarchiques	44
2.3	Comparaison des protocoles de couverture de surface	51
2.3.1	Connaissance des positions géographiques	51
2.3.2	Clustering	51
2.3.3	Inondation du réseau	51
2.3.4	Equilibrage de la consommation d'énergie	51
2.3.5	La phase de découverte des voisins	52
2.3.6	Type de protocole	52
2.4	Conclusion	54
3	Protocole de clustering pour le maintien de la couverture.	55
3.1	Introduction	55
3.2	Motivations	56
3.3	Préliminaires	56
3.3.1	Modèles de capture et de communication	56
3.3.2	Hypothèses	57
3.4	Protocole de clustering pour le maintien de la couverture : ECCoM	57
3.4.1	Principe de base du protocole	57
3.4.2	Caractéristiques du protocole	58
3.4.3	Description détaillée du protocole	59
3.5	Exemple d'application du protocole de clustering	65

3.6 Conclusion	79
4 Simulation et évaluation des performances.	80
4.1 Introduction	80
4.2 Techniques d'évaluation de performances	80
4.3 Simulation et évaluation des performances du protocole proposé	81
4.3.1 Modèle de simulation	82
4.3.2 Les paramètres de simulation	87
4.3.3 Les paramètres de performances	88
4.4 Comparaison des performances	89
4.4.1 Variation du nombre de périodes	89
4.4.2 Variation du nombre de capteurs défaillants	96
4.5 Conclusion	97
Conclusion générale	98
bibliographie	100

Table des figures

1.1	Réseau en mode infrastructure	6
1.2	Réseau en mode Ad hoc	7
1.3	Les composants d'un noeud capteur.	9
1.4	un reseau de capteurs.	12
1.5	exemple d'un capteur redondant.	20
1.6	Couverture de zone(a), (b) Couverture de points, (c) Couverture de barrière.	23
1.7	Relation entre la couverture de zone et la couverture de points.	23
1.8	Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs sans fils.	25
1.9	l'approche centralisée.	26
1.10	l'approche hiérarchique.	26
1.11	l'approche localisée.	27
2.1	Les deux niveaux du protocole Two-Tiered Scheduling.	29
2.2	la structure des périodes d'activités dans l'algorithme 1-CP	36
2.3	Protocole A1 : exemple de topologie - état initial.	40
2.4	protocole A1 : exemple de topologie - étape 1.	40
2.5	protocole A1 : exemple de topologie - étape 2.	41
2.6	protocole A1 : exemple de topologie - étape 3.	41
2.7	protocole A1 : exemple de topologie - étape 4.	42
2.8	protocole A1 : exemple de topologie - étape 5.	42
2.9	L'arc frontière créé par le l'intersection de deux capteurs et la transformation de l'angle dans l'intervalle $[0, 2\pi]$	45
3.1	le protocole ECCoM : divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité.	59
3.2	exemple d'application du protocole ECCoM	65
3.3	exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 1.	69
3.4	exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 2.	72

3.5	exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 3.	75
3.6	exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 4.	78
4.1	Les techniques d'évaluation de performances.	81
4.2	Le modèle d'énergie utilisé dans la simulation.	83
4.3	Etapes de réalisation du simulateur.	86
4.4	Méthode d'évaluation de la couverture.	88
4.5	Taux de couverture en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés. . .	91
4.6	Taux de couverture en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés. . .	92
4.7	nombre de noeuds actifs en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés.	93
4.8	nombre de noeuds actifs en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés.	94
4.9	Consommation totale d'énergie en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés.	95
4.10	Consommation totale d'énergie en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés.	96
4.11	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de noeuds défailants, 200 capteurs déployés.	97



Liste des tableaux

1.1	Les différents types de capteurs	11
2.1	tableau comparatif des protocoles de couverture de surface étudiés	53
3.1	exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la phase de découverte	66
3.2	Exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la première période d'activité.	67
3.3	les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 1.	70
3.4	exemple d'application du protocole ECCoM : deuxième période d'activité.	71
3.5	les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 2.	73
3.6	exemple d'application du protocole ECCoM : troisième période d'activité.	74
3.7	les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 3.	76
3.8	exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la période 4	77
4.1	Les variables descriptives du système.	84
4.2	Evènements discrets du système.	85



Introduction Générale

Les avancées technologiques et techniques opérées dans le domaine des réseaux sans fil, de la micro-fabrication et de l'intégration des microprocesseurs ont fait naître une nouvelle génération de réseaux de capteurs à grande échelle adaptés à une gamme d'applications très variée. Imaginons un ensemble de petits appareils électroniques, autonomes, équipés de capteurs et capables de communiquer entre eux sans fil. Ensemble, ils forment un réseau de capteurs sans fil capable de superviser une région ou un phénomène d'intérêt, de fournir des informations utiles par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs et de les communiquer via des communications multi-sauts, jusqu'à atteindre les stations de base qui sont des points de collecte des données captées. Les stations de base à leur tour, communiquent ces données à l'utilisateur via Internet ou par satellite.

Les réseaux de capteurs sont généralement déployés, en forte densité, sur une zone dans un but précis d'observation de leur environnement. Petits, voire minuscules, leurs ressources sont limitées (c.à.d. faibles capacités de stockage, de calcul et d'autonomie de batterie). Pour assurer une observation permanente de la zone, et garantir l'acheminement des données collectées en direction des stations puits (machines bénéficiant de capacités de traitement et de stockage en théorie illimitées), les noeuds du réseau doivent s'organiser.

Les capteurs déployés peuvent se trouver sur des zones sensibles, distantes ou dangereuses, d'où l'impossibilité d'accéder physiquement aux capteurs déployés. Dans le but d'exploiter le déploiement aussi longtemps que possible, la ressource énergétique doit être épargnée. Pour ce faire, l'activité des capteurs est ordonnancée, certains sont en mode sommeil et économisent leur énergie pendant que d'autres participent à la surveillance. Parmi les critères d'ordonnancement, on citera la couverture de surface qui consiste à surveiller efficacement toute la zone de déploiement. En effet, une zone est dite couverte, si tous les points qu'elle inclut sont observés par au moins un capteur. Plusieurs protocoles de couverture utilisent la technique d'ordonnancement d'activité afin de réduire la consommation énergétique. Parmi ces protocoles on trouve ceux basés

sur le clustering qui consiste en un partitionnement virtuel du réseau en groupes (appelés aussi clusters), chacun étant géré par un chef de groupe (ou cluster-head). En effet, l'un des objectifs principaux de l'utilisation du clustering, est de minimiser le trafic généré lors de l'acheminement des données afin de minimiser la consommation énergétique et, par conséquent, étendre la durée de vie du réseau.

Dans ce travail, nous proposons un protocole basé sur le clustering pour le maintien de la couverture dans les réseaux de capteurs homogènes afin d'ordonnancer l'activité des noeuds. Nommé ECCoM (Pour Energy-aware Clustering Covrage Maintenance), le protocole proposé opère en périodes d'activité. Chaque période est composée de deux phases, une phase de formation de clusters et une phase d'activité (capture, agrégation des données par les clusters heads et envoi des données vers la station de base) en passant au préalable par une phase de découverte des voisins à un seul saut. Dans chaque période, un nombre réduit de noeuds actifs est sélectionné pour maintenir une couverture totale de la zone de déploiement, ce qui réduit la consommation d'énergie. Afin d'évaluer les performances du protocole proposé, nous développerons un simulateur écrit en Java et nous comparons les résultats avec ceux du protocole DEECIC (pour Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres

Le chapitre 1 est constitué de deux parties. La première présente une définition des réseaux sans fils, des réseaux ad hoc et leurs caractéristiques. La deuxième partie est la présentation des réseaux de capteurs sans fils, leurs architectures et les contraintes de conception d'un tel type de réseau, ainsi que quelques problématiques et axes de recherche. Ensuite, une étude de la problématique de couverture a été faite, notamment les types de couverture, la technique d'ordonnancement d'activité, et les critères d'efficacité des protocoles d'ordonnancement.

Le chapitre 2 sera une étude critique des différents protocoles de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Cette étude commence d'abord par la présentation du principe de chaque protocole suivi d'un ensemble de critiques. Puis, nous comparons les protocoles étudiés suivant un certain nombre de critères de performance que nous avons jugé les plus importants.

Dans le chapitre 3, nous donnerons une description détaillée de l'approche proposée pour le maintien de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Un exemple d'application sera également présenté dans ce chapitre.

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

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

Présentation des réseaux sans fil et réseaux de capteurs

Sommaire

1.1 introduction	4
1.2 Les réseaux sans fil et Ad hoc	5
1.3 Les réseaux de capteurs sans fil	8
1.4 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc mobiles	18
1.5 Etude du problème de la couverture dans les RCSFs	19
1.6 L'ordonnancement d'activité	24
1.7 Conclusion	27

1.1 introduction

Les réseaux sans fil, plus particulièrement les réseaux Ad hoc, connaissent aujourd'hui une très grande popularité dans le domaine des télécommunications, leur succès est essentiellement dû aux équipements mobiles à faible coût.

Le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température la pression ou encore la luminosité et la surveillance des polluants (par exemple l'ozone), en plus des progrès réalisés ces dernières années dans les domaines de la micro-électronique et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire à un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. De ce fait, un nouveau domaine de recherche a vu le jour pour offrir des solutions économiquement intéressantes et facilement déployables : il s'agit des réseaux de capteurs sans fils (RCSFs ou Wireless Sensor Network).

Dans ce chapitre, nous définissons en premier lieu les réseaux sans fils, les réseaux ad hoc et de présenter leurs caractéristiques. En deuxième lieu, nous présentons des généralités sur les réseaux de capteurs notamment leur architecture, leurs caractéristiques, et leurs domaines d'applications, ainsi que les problèmes liés à leurs conceptions. Et en fin, nous entamons l'un des problèmes

majeurs des réseaux de capteurs la couverture, et de trouver la solution qui palie au problème de la couverture qui est l'ordonnancement d'activité des nuds capteurs.

1.2 Les réseaux sans fil et Ad hoc

1.2.1 Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil (*Wireless Network*) est un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fils, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité" [2].

Les réseaux sans fils sont basés sur une liaison utilisant des ondes radio-électriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions [2].

1.2.1.1 Catégories des réseaux sans fils

a) Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Le réseau personnel sans fil (WPAN pour *Wireless Personnel Area Network*) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée ; de l'ordre de quelque dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, etc) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN par exemple : Bluetooth, Zig-Bee, infrarouge etc [2].

b) Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Le réseau local sans fil (WLAN pour *Wireless Local Area Network*) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres .Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs technologies concurrentes on site WI-FI (802.11) [2].

c) Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN pour *Wireless Métropolitain Area Network*) sont connus sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La boucle locale Radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbps pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunications

[2].

d) Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Le réseau étendu sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sans fil sont : GSM (pour Global System for Mobile Communication), GPRS (pour General Packet Radio Service) et UMTS (pour Universal Mobile Télécommunication System) [2].

Les réseaux sans fil peuvent être classés en deux catégories. Dans la première catégorie, figurent les réseaux sans fil avec infrastructure (voir figure 1.1) où un point d'accès AP (Access point) assure la liaison entre les mobiles. La deuxième catégorie est celle des réseaux ad hoc (voir figure 1.2) [2].

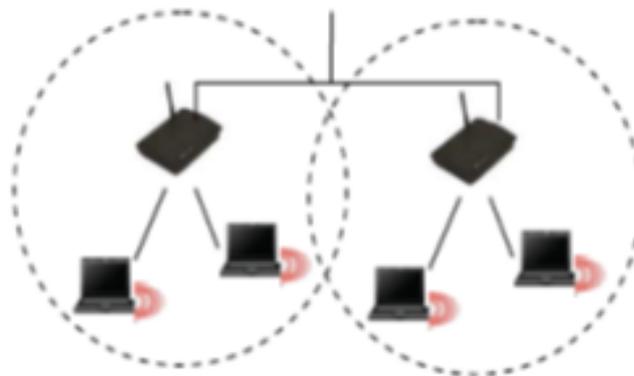


FIGURE 1.1: Réseau en mode infrastructure

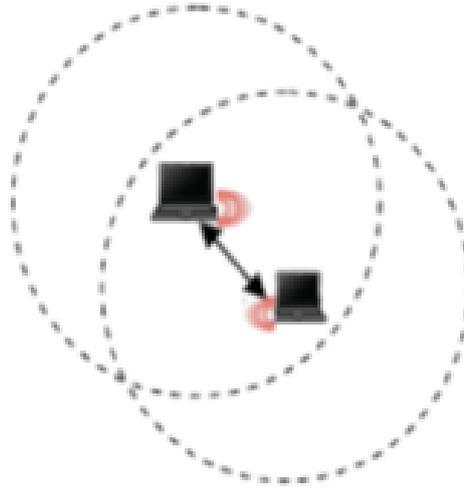


FIGURE 1.2: Réseau en mode Ad hoc

1.2.2 Présentation des réseaux Ad hoc

Le terme " ad hoc " est une locution d'origine latine qui signifie " qui convient au sujet, à la situation " ; on parle alors de réseau auto adaptatif. Un réseau mobile ad hoc ou MANET (pour Mobile Ad hoc NETwork) est un ensemble de noeuds mobiles communiquant entre eux sans fil et sans infrastructure (voir figure 1.2). Dans un tel réseau, les mobiles sont dynamiquement et arbitrairement éparpillés d'une manière où l'interconnexion peut changer à tout moment [2].

1.2.2.1 Caractéristiques des réseaux Ad hoc

Les réseaux mobiles ad hoc présentent plusieurs caractéristiques dont les principales sont les suivantes [1] :

- **Absence d'infrastructure**

Les réseaux ad-hoc sont formés spontanément à partir de noeuds mobiles sans nécessiter l'appui d'une infrastructure fixe ou préexistante. Ainsi, les réseaux ad-hoc peuvent être déployés facilement et rapidement en permettant des échanges directs entre stations mobiles .

- **La mobilité**

La mobilité des noeuds constitue une caractéristique très spécifique des réseaux ad hoc. En effet, un noeud ad-hoc est susceptible de rejoindre ou quitter le réseau à tout instant, comme il peut se déplacer dans le territoire. La topologie du réseau peut donc être fortement dynamique

et non susceptible.

- **La contrainte d'énergie**

La consommation d'énergie constitue une contrainte importante pour les noeuds alimentés par des sources d'énergie autonomes telles que les batteries. En effet, les noeuds sont fortement contraints par la durée de vie limitée de leurs batteries et cela limite les services et les applications supportées par chaque noeuds.

- **La bande passante limitée**

Le support physique sans fil offre une bande passante limitée qui doit être partagée entre les noeuds d'un même voisinage. Ce partage fait que la bande passante réservée à un noeud soit modeste.

- **L'hétérogénéité des noeuds**

Le réseau ad-hoc est formé par un ensemble de noeuds hétérogènes de capacité différente. En effet, un noeud peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées. De plus, les noeuds peuvent avoir des différences en termes de capacité de traitement (mémoire, CPU).

- **La sécurité limitée**

Vu l'absence d'une administration centrale, les réseaux ad-hoc sont plus susceptibles à des problèmes liés à la sécurité. En effet, les possibilités qu'un noeud malicieux s'insère dans le réseau sont plus grandes et donc une attaque par déni de service peut être facilement réalisée par exemple en surchargeant un noeud voisin avec une quantité importante de trafic à router.

1.3 Les réseaux de capteurs sans fil

1.3.1 Le micro capteur, définition et architecture

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base [3].

Deux types de noeuds capteurs peuvent être distingués : capteurs (noeuds ordinaires) et noeuds puits [4]. Un noeud capteur capte des phénomènes physiques et surveille son environnement immédiat pour transmettre les données captées au noeud puits. Ce dernier, les collecte, les stocke

et les analyse pour communiquer les résultats à d'autres réseaux auxquels il est connecté via Internet ou par Satellite [4, 5].

1.3.1.1 Architecture d'un micro-capteur

Le micro-capteur est composé de deux architectures : matérielle et logicielle.

- **L'architecture matérielle [6]**

Un noeud capteur contient principalement quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation GPS (pour Global Position System), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire).

On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité.

Le schéma de la figure 1.3 illustre l'architecture d'un noeud capteur.

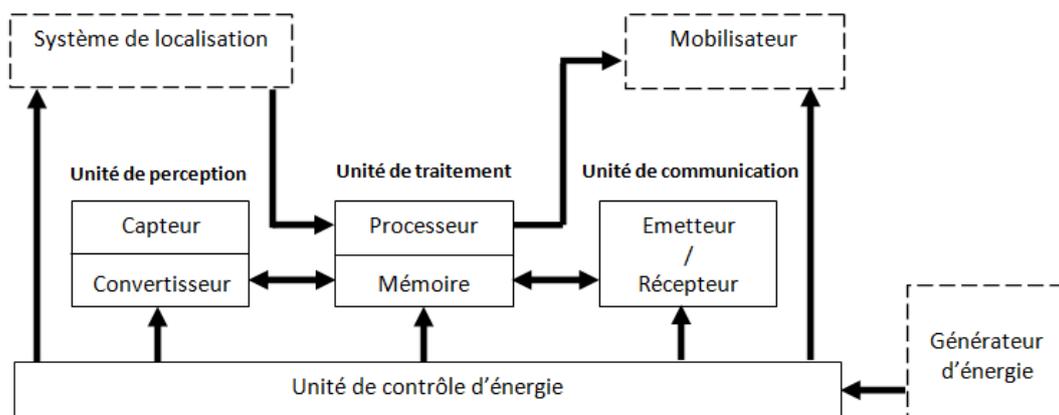


FIGURE 1.3: Les composants d'un noeud capteur.

a) L'unité de captage

L'unité de captage est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et le convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur observe les phénomènes et fournit des signaux analogiques au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

b) L'unité de traitement

Elle comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation conçu spécialement pour les micro-capteurs. Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication permettant de faire collaborer le nœud avec d'autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.

c) L'unité de transmission

Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un médium sans fil. Elle peut être de type optique, ou radio-fréquence entre le nœud capteur et ses voisins ou entre le capteur et la station de base.

d) L'unité de contrôle d'énergie

Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) qui est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses. Elle peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé tels que les cellules solaires afin d'étendre la durée de vie du réseau.

• L'architecture logicielle

TinyOS est le système d'exploitation le plus utilisé dans les réseaux de capteurs [7]. C'est un système open-source conçu pour des réseaux de capteurs sans fils, programmé en langage NesC (dialecte du C). Il a été principalement développé et soutenu par l'université américaine de Berkeley. La particularité principale de ce système d'exploitation est sa taille extrêmement réduite en termes de mémoire (quelques kilooctets).

Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant ainsi la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires que présentent les réseaux de capteurs [7].

1.3.2 Types de capteur

Les capteurs sont disponibles en différents modèles et dépendent de l'application à laquelle ils sont destinés. Les caractéristiques de quelques types de capteurs et leurs illustrés dans le tableau 1.1 [8] :

Nom du capteur	Microcontrôleur	Module radio	Programme+mémoire de données	Mémoire ex- te- rieure
AVRraven Atmel AVR Raven wire- less kit	AtMega1284p + AT- mega3290p	ATMEGA128 RFA2	128 Kbytes + 16 Kbytes	256 kB
Prix BNode	Atmel AT- mega 128L (8 MHz @ 8 MIPS)	Chipcon CC1000 (433-915 MHz) and Bluetooth (2.4 GHz)	64+180 K RAM	128K FLASH ROM, 4K EE- PROM
EPIC mote	Texas Ins- truments MSP430 mi- crocontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chip- con Wireless Transcei- ver	10k RAM	48k Flash
GWnode	PIC18LF8722	BiM (173 MHz) FSK	64k RAM	128k flash
Mica2	ATMEGA 128L	Chipcon 868/916 MHz	4K RAM	128K Flash
MicaZ	ATMEGA 128	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	4K RAM	128K Flash
Iris Mote	ATmega 1281	Atmel AT86RF230 802.15.4/ZigBee compliant radio	8K RAM	128K Flash
TelosB	Texas Ins- truments MSP430 mi- crocontroller	250 kbit/s 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Chip- con Wireless Transcei- ver	10k RAM	48k Flash

TABLE 1.1: Les différents types de capteurs

1.3.3 Architecture d'un RCSF

Un réseau de capteurs est constitué de milliers de noeuds appelés noeuds capteurs ou tout simplement capteurs, permettant de capter et collecter des événements, d'analyser les traitements et de transmettre les informations recueillies dans différents environnements. Ces noeuds peuvent avoir des positions fixes ou bien être déployés aléatoirement pour surveiller l'environnement. Les communications dans un réseau de capteurs se font souvent d'une manière multi saut [3].

L'écoulement des données se termine vers des noeuds spéciaux appelés noeuds-puits ou stations de base (sink). Ces noeuds-puits sont des bases de contrôle qui possèdent plus de ressources matérielles et permettent de collecter et stocker les informations issues des capteurs.

En d'autres termes le fonctionnement d'un réseau de capteurs se déroule de la manière suivante : les noeuds sont déployés dans une zone appelée zone d'intérêt pour la surveiller. Lorsqu'un noeud détecte un évènement, il le traite localement et l'achemine vers la station de base via une communication multi-saut. La communication entre les stations puits et l'utilisateur se fait via Internet ou satellite. Ce processus est illustré dans la figure suivante.

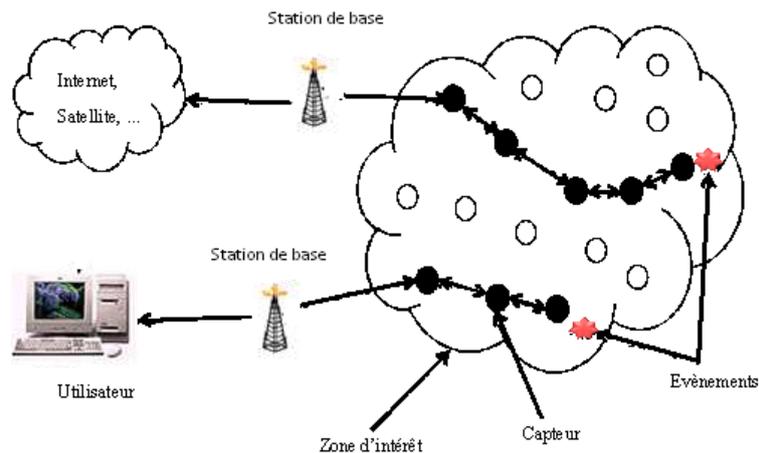


FIGURE 1.4: un reseau de capteurs.

1.3.4 Les domaines d'applications des RCSFs

La taille de plus en plus réduite des micro-capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications.

1.3.4.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs ont été et sont utilisés pour des objectifs militaires (analyse du terrain, la surveillance des ennemis et le suivi de cibles). Leurs caractéristiques de déploiement rapide, de coût réduit, d'auto-organisation et de tolérance aux pannes les rendent appropriés et indispensables.

1.3.4.2 Applications liées à la sécurité

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les budgets consacrés à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant des résultats plus fiables. Comme exemple d'applications de ce type nous pouvons citer :

- La détection des altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton,
- La surveillance des mouvements afin de constituer un système de détection d'intrusions distribué.

L'aspect distribué rend plus complexe la possibilité de mettre hors d'usage ce système de surveillance [9].

1.3.4.3 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, tels que la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des noeuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes, les inondations, la pollution des industries (les déchets industriels). Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours [9].

1.3.4.4 Applications médicales

Les capteurs peuvent être implantés dans le corps humain pour la surveillance du niveau de glucose, le monitoring des organes vitaux ou la détection de certaines maladies. L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies [9].

1.3.4.5 Applications écologiques

Dans un contexte mondial où le réchauffement de la planète devient une préoccupation grandissante, l'utilisation des réseaux de capteurs pour optimiser la consommation des ressources énergétiques peut avoir une conséquence environnementale positive.

Un exemple de ce type d'applications est l'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits occupés par des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie [9].

1.3.4.6 Applications de traçabilité et de localisation

Suite à une avalanche, il est nécessaire de localiser les victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement les victimes. Contrairement aux solutions de traçabilité et de localisation basées sur le système de GPS (Global Position System), les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans des endroits confinés comme les mines par exemple [9].

1.3.4.7 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourrait être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.

1.3.4.8 Habitat

Les RCSFs sont déployés pour le contrôle et la détection de problèmes structureux dans les bâtiments et les immeubles. Ceci facilite la tâche de maintenance des édifices et permet d'empêcher les désastres.

1.3.5 Exemples de projets autour des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sont actuellement exploités dans plusieurs domaines, ceci est dû aux récents développements réalisés dans le domaine des technologies sans fil (Wireless) [10].

Voici quelques projets [10] qui ont été réalisés autour des réseaux de capteurs avec la participation de l'INRIA (l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), un institut de recherche publique placé sous la tutelle des Ministères de la Recherche et de l'Industrie.

- **WASP (pour wirelessly Accessible Sensor Populations)** : ce projet a été réalisé entre 2006 et 2010, ce dernier a été mis en place avec des capteurs sur les oreilles des vaches après avoir essayé dans une des poches de leurs estomacs ,

- **SVP (pour Surveiller et Prévenir)** : Ce projet propose l'étude, la réalisation et l'expérimentation d'une architecture ambiante intégrée pour faciliter la conception, le déploiement et l'exploitation optimale de services de surveillance et de prévention sur différents types de réseaux dynamiques. Il a été réalisé entre 2006 et 2009. Voici quelques exemples de du projet SVP :

1. un réseau pour mesurer l'activité physique des enfants et prévenir les problèmes d'obésité par la surveillance.
2. un réseau pour éviter les accidents sur le Port du Havre qui causent 1 mort par an, pendant le déplacement des containers à l'aide de "cavaliers". En cas de danger chaque docker peut appuyer sur un bouton qui arrête toute activité sur le port.

- **SensLab** : Est une plateforme de test de 4 sites de 256 capteurs par site, permet d'expérimenter avec un grand nombre de capteurs.

- **Bin That Thinks** : C'est un projet d'amélioration de tri et de collecte de déchets à base de la radio-identification plus souvent désignée par le sigle RFID (pour Radio Frequency IDentification) est une méthode pour mémoriser et récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés " radio-étiquettes " (RFID tag ou RFID transponder).

- **Rescue** : Ce projet consiste à déployer d'un réseau de secours dans le cas, par exemple, d'une fibre coupée par erreur ou par accident.il a prouvé son utilité lors d'une coupure des services d'urgences d'une grande ville américaine pendant 12 heures.

1.3.6 Les contraintes de conception des RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [11] :

1.3.6.1 La tolérance aux fautes

Certains noeuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou

plusieurs capteurs.

1.3.6.2 Le passage à l'échelle

Le nombre de noeuds déployés dans une zone a surveillé peut atteindre le million. Un nombre aussi important de noeuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le puits (sink) soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.

1.3.6.3 L'environnement

Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au-delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.

1.3.6.4 La topologie de réseau

Le déploiement d'un grand nombre de noeuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : Déploiement, Post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), Redéploiement de noeuds additionnels.

1.3.6.5 Les contraintes matérielles

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,..), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.

1.3.6.8 La consommation d'énergie

Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie ($< 1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque noeud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques noeuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.

1.3.7 Différentes problématiques dans les réseaux de capteurs

Les recherches dans le domaine des réseaux de capteurs ont révélé plusieurs problématiques, parmi ces problématiques, nous citons :

1.3.7.1 Routage

Concevoir un protocole de routage performant en termes de minimisation de la consommation de l'énergie, du choix des routes optimales pour l'acheminement de l'information d'un capteur à la station de base et vice versa, de réduction du délai de délivrance des paquets. Ainsi le réseau doit passer à l'échelle sans que ses performances se dégradent [3].

1.3.7.2 Accès au medium

La spécificité des réseaux de capteurs sans fil mobiles nécessite le développement de nouveaux protocoles MAC qui s'adaptent aux contraintes imposées par ces réseaux. Ceci dans le but d'améliorer le débit, minimiser la consommation d'énergie, optimiser le partage du médium ainsi que minimiser le délai de délivrance des paquets [3].

1.3.7.3 Diffusion de l'information

Les protocoles de diffusion conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte de leurs spécificités ainsi que de leurs contraintes intrinsèques imposées. Ainsi, pour concevoir un protocole efficace, il faudrait assurer une couverture maximale des capteurs composant le réseau (taux d'accessibilité supérieur 90%), minimiser le nombre des réémetteurs et des réceptions redondantes ainsi que la consommation d'énergie [3].

1.3.7.4 Sécurité

Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité, et d'intégrité doivent être mis en place au sein de leur communauté. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées que présentent ces réseaux [3].

1.3.7.5 Couverture

La principale fonction d'un réseau de capteurs réside à surveiller une zone d'intérêt sous les différents contraintes que présentent les noeuds capteurs. Cette surveillance doit satisfaire un certain nombre d'exigences, notamment la durée de vie maximale du réseau et la qualité de sur-

veillance. Pour cela, il est important de planifier et d'organiser l'activité des capteurs du réseau afin de réaliser la tâche voulue de manière efficace [3].

1.4 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc mobiles

Les RCSFs sont un cas particulier des réseaux ad hoc, donc ils sont souvent comparés aux réseaux ad hoc dans leur configuration mobile. Ces derniers sont connus sous le nom de MANet (Mobile Ad-hoc NETWORKS).

1.4.1 Les similitudes entre les RCSFs et MANets

Les points communs essentiels sont [9] :

Tous les deux sont des réseaux ad hoc, c'est à dire, ils fonctionnent sans avoir besoin d'une infrastructure pour la gestion des échanges. De ce fait, ils ont besoin d'être auto-configurable.

Tous les deux sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée des communications est limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées et les puissances mises en jeu. Ainsi, les noeuds dans ces types de réseaux sont souvent dans des configurations multi-sauts ce qui induit la mise en place de protocoles de routage multi sauts.

Le medium utilisé pour l'échange entre les noeuds est l'air. Ainsi, les protocoles d'accès au medium des réseaux MANET et des RCSF sont très proches et sont typiquement en mode half-duplex (les entités étant incapable de recevoir et d'émettre en même temps).

Ces réseaux travaillent sur une bande de fréquences non propriétaire, ce qui rend leurs communications vulnérables aux problèmes d'interférences.

Les entités de ces réseaux sont souvent alimentées par des batteries à faible autonomie.

Malgré les points sur lesquels ces deux types de réseaux convergent, ils diffèrent sur plusieurs aspects.

1.4.2 Les différences entre les MANets et les RCSFs

Les points sur lesquels ils divergent sont [9] :

Les entités d'un réseau MANET sont souvent des entités utilisées directement par des êtres humains, comme les portables, les PDA, etc. Dans les réseaux de capteurs sans fil les entités interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement ou entre-elles.

Dans un réseau de capteurs sans fil, le nombre de noeuds peut dépasser de plusieurs ordres grandeurs celui des réseaux MANET, ce qui rend le problème du passage à l'échelle plus critique dans les RCSF.

Le fait que les noeuds dans un RCSF, sont souvent déployés dans des environnements hostiles (forêts, volcans, etc.) les rend vulnérables et risque de tomber en panne beaucoup plus souvent que les noeuds dans un réseau ad hoc. De ce fait, les topologies dans les RCFS sont assez dynamiques et doivent être robustes pour pallier aux problèmes de pannes, contrairement aux réseaux MANET où le défi essentiel des protocoles du réseau est typiquement la mobilité des noeuds.

Les noeuds dans un RCSF sont déployés pour des durées en mois, et voire en années, sans l'intervention humaine. Dans la plupart des cas, ces noeuds sont alimentés par des batteries. Cette contrainte affecte le fonctionnement de ces noeuds et les oblige à travailler selon un cycle d'activité intermittent. Ceci a un effet direct sur la disponibilité des noeuds : un noeud en état inactif ne peut pas communiquer avec les autres noeuds du réseau. Ainsi, la conception des protocoles dans un RCSF doit prendre en compte cette contrainte qui n'est pas présente dans un réseau MANET.

Les échanges de données dans les applications d'un réseau RCSF sont souvent du type collecte de données. Les noeuds doivent envoyer vers un puits des informations sur des phénomènes observés, ceci soit à la demande du puits, périodiquement, au déclenchement d'une alarme, ou bien un mélange des trois. A contrepartie, les applications des réseaux MANET sont plus orientées calcul distribué et donc le trafic circule entre tous les noeuds du réseau.

Les entités dans un RCSF possèdent de faibles capacités de calcul et de stockage, ce sont des modules qui fonctionnent avec des microcontrôleurs d'une fréquence de quelques MHz optimisé, pour consommer peu d'énergie. Les noeuds dans un MANET sont plus puissants et possèdent des capacités beaucoup plus importantes.

Les RCFS sont qualifiés de réseaux à basse consommation et a bas débit (Low-Power Low-Rate Wireless Personal Area Network, LP-LR-WPAN), ceci n'est pas le cas des réseaux MANET même si les noeuds d'un réseau MANET sont souvent alimentés par des batteries facilement rechargeables.

1.5 Etude du problème de la couverture dans les RCSFs

Nous avons vu que l'économie d'énergie et la prolongation de la durée de vie sont des paramètres fondamentales dans les réseaux de capteurs. Dans cette optique, plusieurs stratégies ont été proposées dans la littérature pour ordonnancer l'activité des capteurs déployés dans la zone d'intérêt afin d'assurer la couverture totale de la zone d'intérêt [3].

La couverture de zone peut prendre plusieurs formes. La plus simple quand tout point p se trouve dans la zone de perception d'un seul capteur. Dans ce cas, on parle de la 1- couverture. En outre, on parle de la k -couverture ($k > 1$) lorsque tout point p de la zone d'intérêt est couvert par plusieurs capteurs [3].

Par ailleurs, quand les capteurs sont déployés en grand nombre dans une zone d'intérêt, la zone d'intérêt est entièrement couverte par un ensemble de capteurs en état actif ce qui engendre une redondance lors de la capture d'un événement (voir figure 1.5) [3]. Il est important d'ordonner l'activité des noeuds en activant un sous ensemble de capteurs qui assure la couverture totale de la région d'intérêt, et en mettant les capteurs couverts par leurs voisins actifs en mode passif [3].

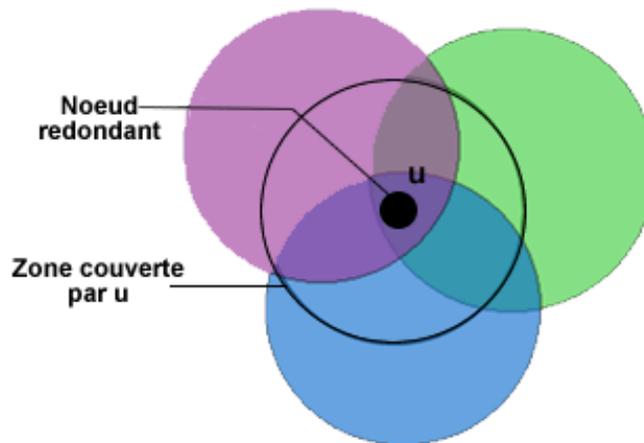


FIGURE 1.5: exemple d'un capteur redondant.

1.5.1 zone de surveillance d'un capteur

La zone de surveillance ou de capture d'un capteur C_i placé aux coordonnées (x_i, y_i) est représentée par la surface

$$S(C_i) = \{X \in P \mid d(X, X_i) \leq RCap\} \quad (1.1)$$

où $d(X, X_i)$ est la distance euclidienne séparant tout point du plan P du capteur C_i [3].

1.5.2 Surface couverte par un réseau de capteur

Chaque capteur possède une portée de surveillance $RCap$. La forme de la surface observable par un capteur C_i , notée $S(C_i)$, dépend du capteur proprement dit, et il est extrêmement difficile de la caractériser tant qu'elle dépend du matériel utilisé et de l'information qui est relevée. Il est couramment admis dans la littérature que la surface $S(C_i)$ est modélisée par un cercle et de rayon

RCap ; c'est le modèle de capture en disque [3].

$$S(C_i) = P \in A | \text{distance}(C_i, P) \leq R_{Cap} \quad (1.2)$$

où P est un point physique de la zone de déploiement notée A .

1.5.3 Les différentes formulations du problème de la couverture

Cardei et Wu [13], ont réalisé récemment un état de l'art sur les techniques de couverture dans RCSFs et ont dégagé un classement de ces techniques sur la base des critères suivants :

1.5.3.1 Objectif de la couverture

L'objectif de la couverture est de surveiller une zone donnée le plus longtemps possible, c.à.d. de maximiser la durée de vie du réseau. Pour cela, l'ordonnancement d'activité est considéré comme une solution d'importance majeure ; elle réduit le nombre de noeuds actifs en mettant à l'état passif le plus de capteurs redondants possible.

1.5.3.2 Méthode de déploiement des capteurs

Les capteurs sont au préalable déployés sur une zone à surveiller. Différents modes de déploiement sont définis et dépendent essentiellement de la nature de l'application. Il existe deux types de déploiement : le déploiement aléatoire est utilisé dans les environnements difficiles et le déploiement déterministe pour des environnements accessibles.

1.5.3.3 Exigence énergétique

La taille miniaturisée des capteurs impose l'emploi de solutions énergétiques limitées, dans la mesure où le déploiement de ces capteurs dans des zones dangereuses ou inaccessibles rend impossible le rechargement ou le renouvellement des batteries.

1.5.3.4 Caractéristique des protocoles utilisés

Un protocole de couverture peut être centralisé ou distribué et localisé. Dans les protocoles centralisés, l'algorithme est exécuté par une station spécifique et requiert fréquemment des informations globales sur le réseau. Cependant, dans le deuxième type, tous les capteurs exécutent le protocole simultanément sur des informations locales. Les protocoles distribué et localisé sont les mieux adaptés pour les réseaux à grande échelle.

1.5.3.5 Relation entre les rayons de capture et de communication

On dit qu'un réseau de capteurs est homogène si tous les noeuds qui le composent ont les mêmes rayons de captage et de communication, dans le cas contraire, on dit que le réseau est hétérogène [14].

1.5.3.6 La connectivité

La connectivité est la propriété d'avoir au moins un chemin entre tout capteur et la station de base. Ceci afin de garantir l'acheminement des informations collectées en tout moment et que tous les noeuds soient joignables à partir de la station de base.

1.5.4 Les types de couverture

La couverture dans les RCSFs peut être classifiée selon la nature de l'objet à surveiller ou bien en termes de précision des données et de la fiabilité. En se basant sur la nature de l'objet à surveiller, les problèmes de couverture peuvent être aussi classés dans l'une des catégories suivantes[13].

1.5.4.1 Couverture de zone

Dans ce type de couverture, l'objectif principal consiste à surveiller une surface géographique donnée. C'est-à-dire que tout point de la zone d'intérêt est couvert par au moins un capteur. La figure 1.6 (a) montre un exemple de couverture de zone où des capteurs sont déployés aléatoirement sur une zone rectangulaire pour la surveiller.

1.5.4.2 Couverture de points (cible)

L'objectif principal dans ce type de couverture consiste à surveiller un ensemble de points spécifiques dont les positions sont prédéfinies et connues [15,16]. La figure 1.6 (b) illustre un ensemble de capteurs déployés aléatoirement pour couvrir un certain nombre de cibles. Les noeuds en couleur noire connectés forment l'ensemble des capteurs actifs.

1.5.4.3 Couverture de barrière

Lorsqu'un réseau de capteurs est déployé pour détecter des objets pénétrants dans une région protégée, il n'est pas nécessaire d'avoir tous les points de la zone du déploiement couverts par un capteur. Il suffit que les objets (un intrus, par exemple) pénétrant dans la région soient détectés à un point donné dans leur trajectoire ; c'est le problème de la couverture de barrière (frontière) [17].

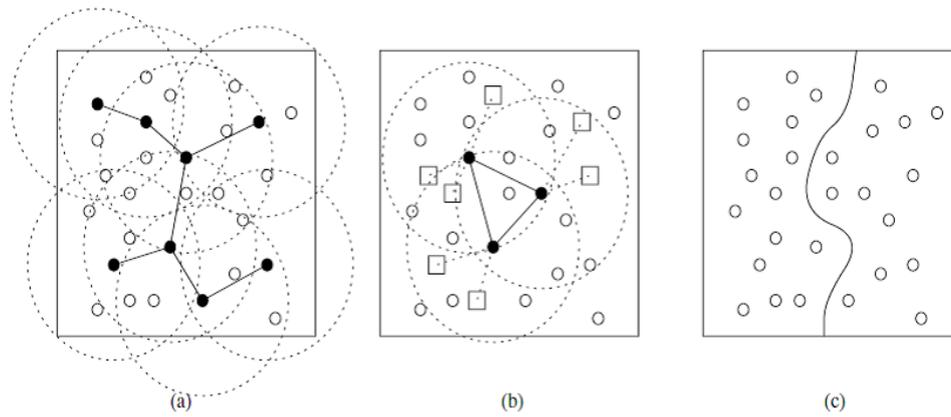


FIGURE 1.6: Couverture de zone(a), (b) Couverture de points, (c) Couverture de barrière.

1.5.5 Relation entre la couverture de points et la couverture de zone

Le problème de couverture de zone peut être transformé en problème de couverture de points en se basant sur la notion de champ. En effet, un champ est un ensemble de points couverts par les mêmes capteurs [18, 19].

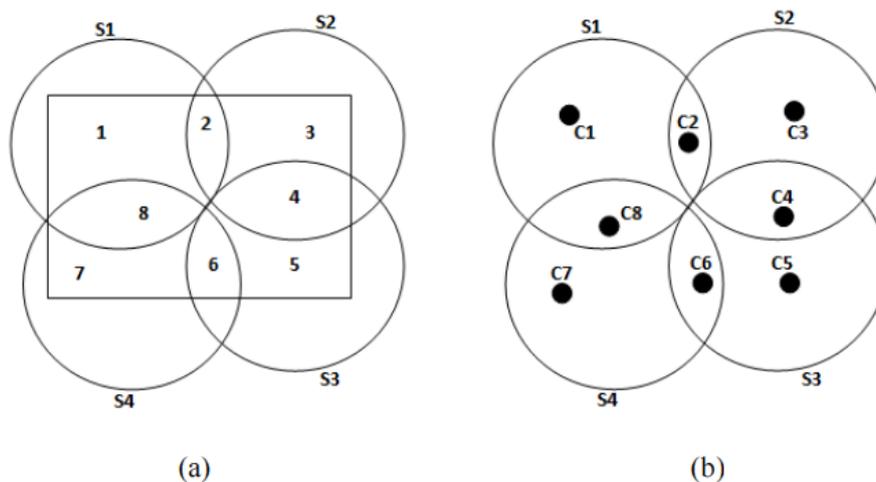


FIGURE 1.7: Relation entre la couverture de zone et la couverture de points.

(a) : couverture de zone. (b) : couverture de point équivalent.

Considérant l'exemple de la figure 1.7(a), les cercles modélisent les zones de surveillance des capteurs S1, S2, S3 et S4, le rectangle modélise la zone d'intérêt. Selon la définition ci-dessus, il y a huit champs dans la figure (a). Soient les cibles C1, ..., C8, donc le problème de couverture de zone est transformé en problème de couverture de cible, comme illustré dans la figure (b).

1.5.6 La couverture simple et la couverture multiple

Dépendant de l'exigence des applications en termes de précision des données et de fiabilité, le problème de couverture peut être divisé en deux types : couverture simple et couverture multiple [3].

1.5.6.1 La 1-couverture

Elle est appelée la couverture simple. Dans un tel type de couverture tout point p de la zone d'intérêt est couvert par un et un seul capteur, autrement dit tout point p se trouve dans la zone de détection d'un seul capteur.

1.5.6.2 La k -couverture

Dans ce type de couverture, chaque point physique de la zone à surveiller est couvert par au moins k capteurs actifs ; on parle alors de la couverture multiple. Une zone est dite k -couverte s'il existe k ensembles disjoints de noeuds actifs, chacun assurant une couverture simple de la zone. Cette définition est appelée k -couverture [3]

Le niveau de couverture dépend de l'application envisagée. Par exemple, les applications requièrent une couverture simple ($k=1$) si les capteurs sont déployés dans un bâtiment pour relever la température, l'humidité ou encore pour mesurer l'intensité lumineuse ou sonore ; c'est-à-dire là où l'environnement est connu et les défaillances ne sont pas importantes.

1.6 L'ordonnancement d'activité

Les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants. En effet, suivant l'application, on déploiera plus ou moins de capteurs dans le but d'augmenter la durée de vie de l'application. À tout moment, il existe donc des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement, on parle alors de capteurs redondants. Cette redondance est exploitée par l'ordonnancement d'activité. En effet ordonnancer l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser les noeuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les autres sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie [20].

L'énergie n'est pas la seule contrainte justifiant un recours à l'ordonnancement d'activité, d'ailleurs lorsqu'un événement se produit sur la zone de déploiement, il est inutile d'avoir un nombre élevé de capteurs qui le reporte ce qui engendre d'une part un problème de redondance. Et d'autre part de nombreux désagréments au niveau de l'accès au médium, vu que tous les noeuds veulent émettre simultanément pour signaler l'événement [20].

L'ordonnancement d'activité consiste à organiser l'activité des capteurs de façon à ce que l'ensemble des capteurs actifs soit capable de couvrir la même surface que celle couverte par l'ensemble des capteurs du réseau. La figure 1.8 (a) nous montre un réseau de capteurs déployés sur une zone à surveiller. Cette surveillance ne requiert pas une activité permanente de la part de tous les noeuds comme illustré en figure 1.8 (b), où un seul sous-ensemble des capteurs suffit à la couverture de zone [20].

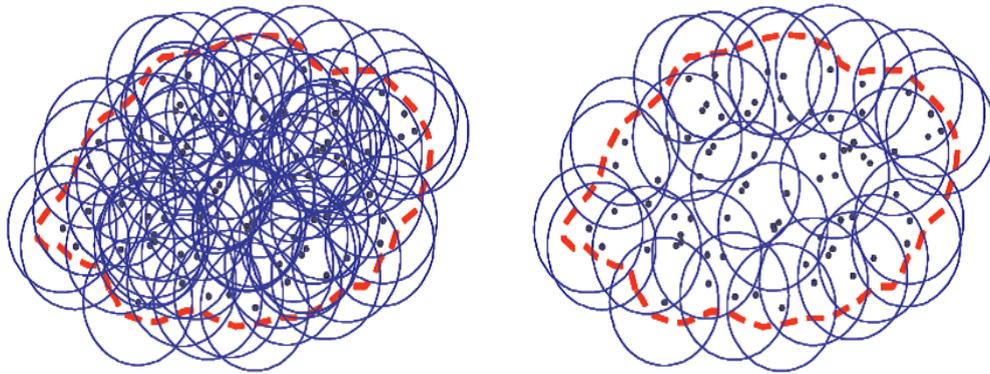


FIGURE 1.8: Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs sans fils.

Dans la conception d'une solution pour l'ordonnancement d'activité des capteurs et pour garantir la couverture totale d'une zone d'intérêt, le premier challenge est de déterminer si une zone couverte par un capteur est aussi couverte complètement par ces voisins ? Si c'est le cas, ce noeud est redondant en termes de couverture et peut être mis en état passif. Le deuxième challenge est de déterminer les périodes d'activité et pour chaque capteur.

1.6.1 Gestion de l'ordonnancement

L'ordonnancement d'activité peut se faire de diverses façons : les approches centralisées, hiérarchiques et les approches localisées [20].

1.6.1.1 Approche centralisée

Dans l'approche centralisée, il faut pouvoir bénéficier d'une entité centrale (représentée par un carré sur la figure 1.9) ayant vue sur tout le réseau. Cette entité peut ainsi assigner à chaque objet un rôle. En cas de pannes ou de mobilité des noeuds cette entité informe les noeuds concernés [20]. Ces solutions d'ordonnancement ne sont donc adaptées que lorsque l'environnement peut être atteint et qu'une infrastructure existe ou peut y être déployée [20].

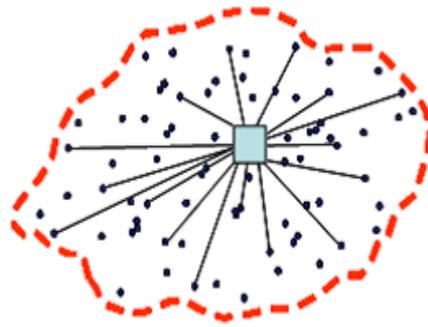


FIGURE 1.9: l'approche centralisée.

1.6.1.2 Approche hiérarchique

Dans ce type d'approches, le réseau est organisé en plusieurs entités responsables des sous-ensembles du réseau. Pour cela, diverses solutions existent telles que l'élection de chefs de ces sous-ensembles (représentés par des carrés sur la figure 1.10) [20].

Dans un ordonnancement hiérarchique, les informations de changements de topologie ne sont propagées qu'au sein des sous-structures. Ceci en fait des solutions plus favorables au passage à l'échelle. Contrairement à une approche centralisée où la complexité exponentielle serait accumulée dans une seule entité, elle serait ici répartie sur les différents sous-ensembles du réseau. Il reste néanmoins problématique de gérer les appartenances à ces sous-ensembles et le passage éventuel de l'un à l'autre [20].

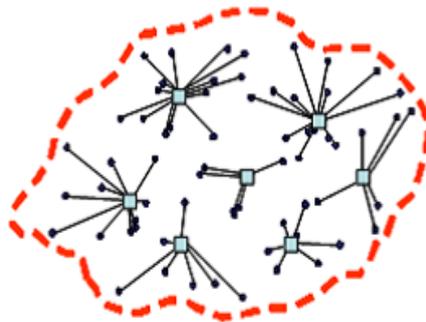


FIGURE 1.10: l'approche hiérarchique.

1.6.1.3 Approche localisée

Dans les approches localisées aucune hiérarchie ni infrastructure existe comme illustré sur la figure 1.11. L'objectif est d'obtenir un comportement global cohérent à partir de comportements locaux des noeuds. Dans une approche localisée, le comportement de chaque objet n'est influencé que par celui de ses voisins directs. Les changements de topologie du réseau (dus à la mobilité,

aux pannes ou à des changements de statut) ne sont par conséquent vécus par les noeuds que comme de simples modifications de leurs voisinages.

Ceci permet d'obtenir des solutions robustes, adaptables et surtout passables à l'échelle, aspect extrêmement important dans des réseaux où les densités évoquées peuvent être d'une centaine de noeuds par zone de communication [20].

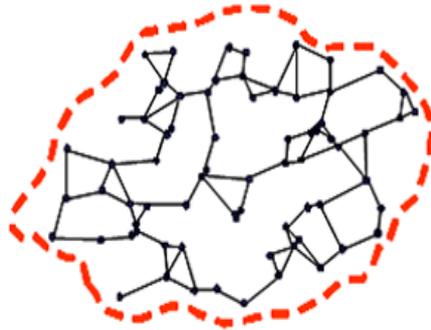


FIGURE 1.11: l'approche localisée.

1.7 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et autre. La flexibilité, coût réduit, et facilité de déploiement ont donné naissance à divers axes de recherche, ainsi que de nombreuses possibilités de développement dans divers domaines. Par ailleurs, l'un des problèmes majeurs des réseaux de capteurs est la couverture. Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux sans fils en général et plus précisément leurs concepts de base, nous avons également introduit le problème de couverture et la technique d'ordonnancement d'activité de noeuds capteurs.

Plusieurs solutions au problème de couverture de surface ont été proposées dans la littérature, elles sont basées essentiellement sur l'ordonnancement d'activité. Le chapitre suivant décrira quelques protocoles proposés pour résoudre un tel problème.

Etude de quelques protocoles de couverture de surface

Sommaire

2.1 Introduction	28
2.2 Etude de quelques protocoles de couverture	28
2.3 Comparaison des protocoles de couverture de surface	51
2.4 Conclusion	54

2.1 Introduction

La couverture est l'un des problèmes essentiels dans les réseaux de capteurs sans fil. Un tel réseau est constitué de noeuds caractérisés essentiellement par une faible autonomie de batterie, en raison de cette limite, la conservation d'énergie devient primordiale. Plusieurs protocoles [21, 22] ont été développés dans la littérature dans le but de prolonger la durée de vie du réseau, en économisant l'énergie, tout en assurant la couverture totale d'une zone géographique. Les protocoles de couverture visent à mettre dans l'état passif les capteurs redondants, tout en préservant la couverture totale (de la zone ou des cibles) par les noeuds qui restent actifs.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'étude de quelques protocoles proposés dans la littérature pour résoudre le problème de la couverture de surface.

2.2 Etude de quelques protocoles de couverture

En se basant sur le type du protocole utilisé, les solutions du problème de la couverture peuvent être classées en solutions distribuées, centralisées ou hiérarchiques [20]. D'autres protocoles sont basés sur la connaissance de positions des capteurs [23, 24], c'est-à-dire, chaque capteur connaît ses coordonnées géographiques obtenues par l'utilisation d'un dispositif de localisation appelé GPS (pour Global Position System). Néanmoins, ce dispositif rend les capteurs plus coûteux et entraîne une consommation considérable d'énergie qui est la contrainte la plus critique dans un réseau de capteurs.

D'autres approches sont basées sur la découverte de la topologie du réseau par échange de messages [25] où la connaissance de positions n'est pas exigée. Il existe d'autres approches qui utilisent l'estimation de la distance entre les capteurs pour l'ordonnancement de leur activité [26, 27].

2.2.1 Les protocoles centralisés

2.1.1.1 Algorithme d'ordonnancement à deux niveaux

Tezcan et Wang [28], ont proposé un protocole centralisé nommé TTS (pour Two-Tiered Scheduling) qui ordonnance l'activité des noeuds selon une architecture à deux niveaux. Le premier niveau est celui de la couverture, il assure une surveillance totale de la zone d'intérêt. Le second est le niveau de connectivité qui maintient un chemin connecté permettant d'acheminer les données à la station de base. Ce dernier est au-dessus du premier niveau.

Ce protocole vise la conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs afin de prolonger la durée de vie du réseau, et ce en mettant le maximum de noeuds à l'état inactif, tout en assurant la couverture totale de la zone d'intérêt par les noeuds qui restent actifs.

Les auteurs supposent que chaque noeud connaît sa position géographique obtenue à travers une méthode de localisation, et possède un rayon de communication deux fois supérieur au rayon de captage.

Description du protocole

Dans cette approche, les capteurs basculent périodiquement entre le mode sommeil et activité dans deux niveaux, comme illustré dans la figure 2.1.

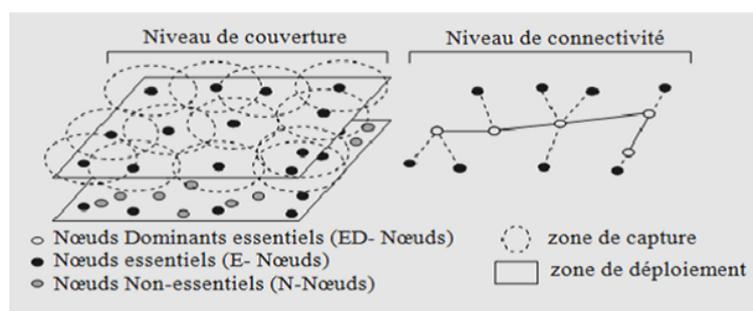


FIGURE 2.1: Les deux niveaux du protocole Two-Tiered Scheduling.

L'ordonnement d'activités des noeuds commence en considérant trois modèles différents d'activité : les noeuds non-essentiels (N-noeuds) qui sont mis en veille, les noeuds essentiels (E-noeuds) qui basculent périodiquement entre l'état actif et passif et les noeuds essentiels dominant (ED-noeud) qui sont toujours actifs.

Le premier niveau

Dans ce niveau, un ensemble de capteurs, assurant la surveillance totale de la zone d'intérêt, sont sélectionnés à base de leur énergie résiduelle. A ce niveau un ensemble de E-noeuds (noeuds essentiels) sera établi, et utilisé dans le deuxième niveau. Les capteurs n'appartenant pas à l'ensemble des noeuds essentiels, sont mis en mode sommeil.

Le deuxième niveau

En se basant sur l'ensemble défini dans le premier niveau, une autre sélection est faite à base de connectivité. Le noeud ayant une connectivité minimale (coût minimale) est supprimé de l'ensemble des E-noeuds à condition que ce dernier reste toujours connecté. On continue à retirer des noeuds jusqu'à ce qu'un minimum de noeuds essentiels (E-noeud) assurent la connectivité, cet ensemble de noeuds constitue l'ensemble des ED-noeuds (ensemble de noeuds essentiels).

Dans cet algorithme, la durée de vie du réseau est divisée en périodes de temps, chaque période est composée de deux phases ; une phase de mise à jour TCU pour la sélection des noeuds dominants et une phase d'activité TNO pour la surveillance et l'acheminement des évènements captés à la station de base.

Discussion

L'avantage principal du protocole TTS est son architecture à deux niveaux, un niveau pour assurer la couverture et un autre pour assurer la connectivité. Néanmoins, TTS exige que le rayon de transmission soit au moins deux fois plus grand que le rayon de capture ce qui est nécessaire pour déterminer le niveau de connectivité avec succès [29].

Le protocole TTS est centralisé, tous les traitements sont faits au niveau de la station de base qui risque d'être surchargée dans le cas des réseaux très denses, d'où le problème du passage à l'échelle. En outre, ce protocole engendre un coût de communication élevé pouvant causer des pertes de messages ou des collisions.

2.1.1.2 Protocole centralisé basé sur les ensembles dominants

Pazand et Datta [30], ont proposé une solution pour palier au problème de couverture, basée sur un concept de la théorie des graphes : les ensembles dominants de cardinalité minimale. Cette solution consiste à ordonnancer l'activité des noeuds afin d'éliminer la redondance tout en préservant un niveau acceptable de couverture de la zone d'intérêt.

Dans ce travail, on suppose que le déploiement des capteurs est uniformément aléatoire dans la zone d'intérêt. Le réseau de capteurs est constitué de noeuds déployés en forte densité, et ce pour garantir initialement une couverture totale de la zone d'intérêt.

Description du protocole

Ce protocole est composé de trois phases : la première phase est la découverte des voisins et la construction du graphe correspondant au réseau qui se fait au niveau de la station de base. La deuxième phase est dédiée à la construction des différents ensembles dominants de noeuds capteurs. La troisième phase exploite les ensembles dominants construits lors de la deuxième phase, afin d'ordonnancer l'activité des capteurs.

Phase 1 : construire le graphe du réseau

Chaque noeud u envoie un message Hello et construit sa table de voisinage grâce à l'écoute de ces mêmes messages. Ces tables sont envoyées à la station de base, pour construire le graphe correspondant au réseau et le représenter par une matrice d'adjacence qui servira d'entrée pour la phase suivante.

Phase 2 : déterminer les ensembles dominants de cardinalité minimale

Afin de déterminer les ensembles dominants de cardinalité minimale, les auteurs ont proposé deux heuristiques différentes, en fonction du rapport entre les rayons de communication (RCOM) et de capture (RCAP). La première heuristique pour le cas où $RCOM = RCAP$ et la deuxième dans le cas où $RCOM > RCAP$. L'approche proposée vise à maximiser le nombre des EDMs, et en même temps à minimiser la cardinalité de chacun d'entre eux.

a) Premier Cas : $R_{cap} = R_{com}$

À partir de la matrice d'adjacence construite lors de la première phase, la station de base sélectionne le noeud p ayant le nombre maximum de voisins (noeuds de degré max). Ce noeud devient le premier membre de M_1 (premier ED). Ensuite, tous les voisins de p sont exclus de la prochaine sélection. Une autre fois, à partir de la matrice d'adjacence, le noeud ayant le deuxième

degré plus élevé est sélectionné comme deuxième membre de M1 et de même pour ses voisins, ils seront exclus de la prochaine sélection.

Ce processus continue jusqu'au traitement de tous les noeuds. Pour le calcul du prochain ED, tous les membres de M1, sont exclus. Le même processus est répété jusqu'à l'obtention de tous les membres des k EDMs : M2, M3,..., Mk.

b) Deuxième cas : $R_{com} > R_{cap}$

Généralement, dans les réseaux de capteurs, le rayon de surveillance est plus petit que la portée de transmission. Par conséquent, une approche différente pour la construction des EDMs est utilisée. De manière semblable au cas précédent, à partir de la matrice d'adjacence on choisit le noeud p de degré max, suivi du choix aléatoire de l'un de ses voisins. Ces deux noeuds sont les premiers membres de M1 ; le premier ED. Ensuite, chaque noeud i adjacent du noeud p est examiné par l'équation suivante :

$$2 \leq nbr - voisins - noeud_i - dans - M_j \leq F$$

où $nbr - voisins - noeud_i - dans - M_j$ est le nombre de voisins du noeud i dans Mj.

S'il satisfait la condition alors le noeud i sera choisi comme membre de l'ensemble M1. Le paramètre F est relatif à la densité du réseau, il est déterminé par des résultats de simulation.

Lorsque tous les voisins du noeud p sont examinés, les noeuds sélectionnés sont exclus lors de la prochaine sélection. Ensuite, le noeud ayant le deuxième degré plus élevé est choisi pour être membre de M1, et de même pour ses voisins que ceux de p. Ce processus continue jusqu'au traitement de tous les noeuds et les noeuds sélectionnés dans M1 sont ignorés lors de la sélection du prochain EDM. Ce processus est répété jusqu'à la détermination de tous les EDMs.

Phase 3 : ordonnancer les ensembles dominants de cardinalité maximale

La troisième phase est celle de l'ordonnancement, au fait les EDMs calculés dans la phase précédente, sont ordonnancés afin d'assurer la couverture totale du réseau. A chaque période, un ED est sélectionné pour surveiller la zone de déploiement. Dans la période suivante, les noeuds actifs dans la période courante sont mis dans l'état passif, et on choisit un autre ED.

Discussion

Le protocole est centralisé, tous les traitements sont faits au niveau de la station de base qui risque d'être surchargée dans le cas des réseaux très denses, d'où le problème du passage à l'échelle.

La phase de découverte du voisinage induit un coût de communication élevé, ce qui augmente la probabilité de perte des messages (à cause des collisions par exemple).

2.1.1.3 Approche de sélection basée sur une heuristique

F. Delicato et al [31], ont proposé une approche simple et efficace, basée sur une heuristique gloutonne pour la sélection des noeuds actifs dans les réseaux de capteurs sans fil. L'objectif principal est de maximiser l'énergie résiduelle pour étendre la durée de vie du réseau, tout en répondant aux exigences spécifiques de l'application en termes de couverture, d'énergie et de qualité de service.

Les auteurs ont formalisé le problème de sélection de noeuds comme un problème de sac à dos [32] qui est un problème de théorie des graphes afin d'adopter une heuristique gloutonne pour le résoudre. Ils ont supposé que le schéma de sélection des noeuds actifs est indépendant du protocole de routage du réseau, et qu'un point p est couvert par un noeud i si la distance euclidienne entre les deux est plus petite que le rayon de captage R_{Cap} , et que deux noeuds i et j peuvent communiquer si la distance euclidienne les séparant est inférieure au rayon de communication R_{Com} des noeuds, c'est à dire, $dist(i, j) < R_{Com}$.

A. Formulation du problème de sélection en un problème de sac à dos

Les noeuds capteurs représentent les objets à mettre dans le sac. La capacité du sac à dos est définie comme une quantité d'énergie nécessaire afin d'accomplir une tâche spécifique. La valeur w_i est le coût de l'énergie du noeud i lors de sa participation à une détection d'un évènement, le noeud i est déterminé par la pertinence potentielle R_i et son énergie résiduelle U_i .

L'algorithme de sélection cherche à maximiser la pertinence R_i et l'énergie résiduelle finale U_i des noeuds sélectionnés. La fonction objective du problème est donnée par :

$$\text{Maximiser } \sum x_i * (\alpha * R_i + \beta * (U_i - w_i)). \quad (2.1)$$

x_i est une valeur binaire, elle est égale à 1 si le capteur i est sélectionné pour participer à la surveillance, et 0 sinon. R_i est une variable indiquant la pertinence d'un noeud i . Le paramètre w_i est l'énergie consommée par le capteur i lors d'une capture. $(U_i - w_i)$ désigne l'énergie finale du capteur i s'il participe à une capture. Les coefficients α et β sont utilisés pour équilibrer les priorités accordées pour chaque terme de l'équation, et ils dépendent des exigences de la qualité de service de l'application.

B. Les contraintes

Le choix des noeuds actifs dans un réseau de capteurs est dominé par un ensemble de contraintes citées ci-dessous, et qui doivent être prises en compte dans le schéma de sélection des noeuds.

a. Les contraintes énergétiques

Les auteurs ont déterminé deux contraintes qui sont liées à l'énergie. La première est liée à la quantité d'énergie disponible dans le réseau qui est une ressource finie. En effet, à chaque période r , l'énergie consommée par le sous-ensemble de noeuds capteurs sélectionnés comme actifs ne doit pas dépasser un certain seuil. La seconde contrainte estime qu'un noeud capteur a le droit de devenir actif dans une période à condition d'avoir assez d'énergie pour rester actif jusqu'à la fin de la période.

b. Les contraintes de couverture et de connectivité

Ces contraintes peuvent être formulées comme suit : étant donné une surface A et un degré de couverture k exigé par l'application, le nombre de noeuds inactifs doit être maximisé sous les contraintes suivantes :

La couverture : Le sous-ensemble de noeuds actifs garantit la k -couverture de la surface A , c'est à dire, pour chaque point p de A est couvert par au moins k noeuds.

La connectivité : chaque noeud i actif possède un chemin valide vers la station de base D , il existe donc une suite de noeuds actifs tel que la distance euclidien entre chaque deux noeuds est inférieur au rayon de communication.

c. La contrainte profil de la qualité de service

Les exigences d'une application de QoS, sont basées sur des paramètres selon la précision, la durée de vie du réseau et le ration (le compromis entre la consommation d'énergie et l'exactitude des données).

Discussion

Les résultats de simulation ont montré qu'il y a des économies d'énergie tout en préservant les exigences de qualité de service. L'algorithme est coûteux en termes de temps d'exécution.

2.2.2 Les protocoles distribués

2.2.2.1 Le protocole décentralisé d'ordonnement d'activités pour la préservation de 1-couverture et conservation d'énergie

C. F. HUANG et al [33] ont proposé un algorithme décentralisé d'ordonnement d'activité pour la conservation d'énergie et la préservation de la couverture, il est nommé 1-CP (pour 1-Coverage-Preserving Protocol). Ce protocole a été étendu par la suite pour assurer la K-couverture, son objectif principal est d'étendre la durée de vie du réseau tout en maintenant la zone de d'intérêt suffisamment couverte.

La solution proposée est basée essentiellement sur le modèle de Yan et al. [34], mais améliore ses résultats en réduisant la complexité des calculs.

Description du protocole 1-CP

Le principe de l'algorithme 1-CP se base sur la division de la durée de vie en une séquence de périodes d'activité de même longueur $T_{periode}$.

Chaque période d'activité est composée de deux phases, une phase d'initialisation de longueur T_{init} et une phase de captage de longueur T_{cap} . La phase d'initialisation permet aux capteurs d'échanger des informations pour le calcul de leurs durée d'activités, tant dis que dans la phase de captage, les capteurs basculent entre les modes actifs et sommeil en fonction de leurs durée d'activité.

Les auteurs ont supposé que les périodes d'activités des capteurs sont synchrones.

Pour un ensemble de capteurs $C = c_1, c_2, \dots, c_n$ déployés dans une zone A, chaque capteur, connaît sa position géographique, son énergie résiduelle (notée E_r) et possède un rayon de capture R_{Cap} . Pour la conservation d'énergie, chaque capteur est capable de basculer entre le mode actif et sommeil. Pour chaque point d'intersection entre les rayons de captures des capteurs, il existe au moins un capteur actif qui le surveille.

Tous les points d'intersection des rayons de captage sont à l'intérieur du rayon de captage de C_i , $i=1, \dots, n$.

Etant donné un nombre naturel k et une valeur de seuil γ , $0 < \alpha < 1$, la durée de vie (k) (γ) d'un réseau de capteurs est la durée qui sépare le déploiement du réseau jusqu'à ce que le rapport de k -espace couvert dans A est inférieur au seuil γ , (Par exemple, la durée de vie (k) (1) est la durée jusqu'à ce que le premier emplacement dans A ne devient pas plus k -couvert).

La figure suivante illustre la division de l'axe de temps en périodes d'activité :

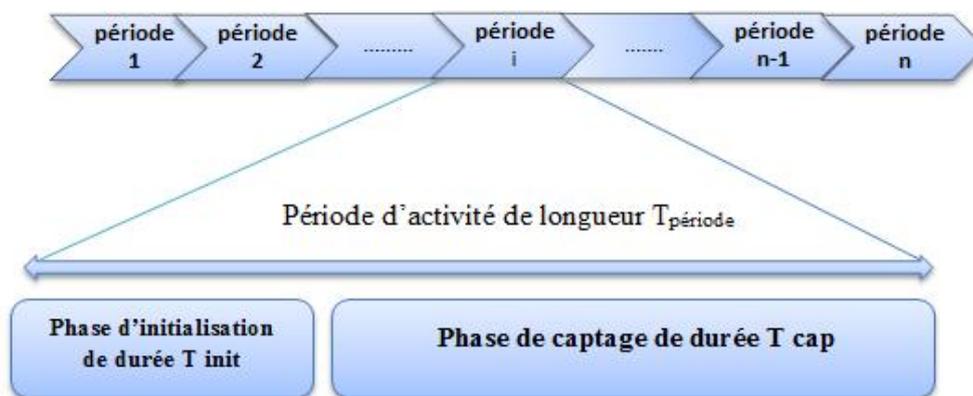


FIGURE 2.2: la structure des périodes d'activités dans l'algorithme 1-CP.

La phase d'initialisation

Lors de la phase d'initialisation, chaque capteur C_i doit se mettre à l'état actif et diffuse un paquet "HELLO" contenant ses coordonnées géographiques (x_i, y_i) , son rayon de captage R_{capi} , son énergie restante E_{ri} et une valeur aléatoire RE_{Fi} générée par le capteur i .

En se basant sur les paquets "HELLO" des voisins, le capteur C_i peut calculer sa durée d'activité. Pour éviter les collisions, un temps aléatoire (ou un back-off) doit être pris avant d'envoyer le message "HELLO".

La phase de surveillance

Cette phase est divisée en n périodes d'activité de même durée $T_{periode}$. Pour chaque période d'activité, un capteur C_i génère aléatoirement un temps aléatoire RE_{Fi} dans l'intervalle $[0, T_{periode}]$ tel que :

Chaque période est divisée en deux zones de différentes longueurs, $[0, 3T_{\text{periode}}/4]$ et $[3T_{\text{periode}}/4, T_{\text{periode}}]$. Les capteurs ayant plus d'énergie génèrent un temps aléatoire REF_i dans l'intervalle $[0, 3T_{\text{periode}}/4]$, tandis que les capteurs avec moins d'énergies génèrent leurs temps d'attente dans l'intervalle $[3T_{\text{periode}}/4, T_{\text{periode}}]$ de façon à équilibrer les charges entre les capteurs.

Par la suite, les auteurs ont étendu le protocole 1-CP en un protocole k-CP de telle sorte que chaque point soit toujours couvert par au moins k capteurs qui assurent la couverture de A dans des périodes de temps différentes, mais les capteurs doivent rester actifs pendant plus de temps pour assurer la k-couverture de la zone A.

Discussions

Ce protocole est basé sur la connaissance de coordonnées des capteurs, il préserve la couverture totale de la zone d'intérêt. La connaissance de l'emplacement peut se faire soit par l'utilisation du GPS, ce qui consomme plus d'énergie, soit par des protocoles de localisation, mais l'erreur de position pourrait être très importante.

Dans le cas de la K-couverture, le protocole 1-CP permet d'assurer la couverture totale de la zone d'intérêt mais ceci génère plus de redondance qui consomme de l'énergie lors de la communication d'une information à la station de base.

2.2.2.2 Le protocole Scalable pour la maintenance de la couverture

J. Lu et al [35] ont proposé SCOM (pour Scalable Coverage Maintenance) qui exploite la densité des capteurs , et permet l'équilibrage de charge, de communication et de complexité de calcul ainsi ,il réalise une efficacité énergétique élevée pour étendre la durée de vie du réseau, tout en préservant la couverture totale de la zone d'intérêt.

Les auteurs ont supposé un réseau composé de capteurs statiques. Chaque noeud connaît ses coordonnées géographiques. Les capteurs obtiennent l'emplacement des voisins par le biais d'un saut de communication. Le rayon de communication R_{Com} est supposé être deux fois plus grand que le rayon de capture R_{Cap} . Les capteurs sont synchronisés, et chaque noeud peut connaître son énergie à un instant donné.

Description du protocole

Le fonctionnement du protocole SCOM est organisé en périodes, chacune est divisée en deux phases : une phase de décision et une phase d'optimisation.

La phase de décision

Initialement les capteurs sont dans un état BOOTSTRAP et disposent d'une liste vide de voisins actifs. Pour prendre la décision, d'être dans un état ACTIF ou INACTIF selon des informations locales sur la couverture et l'énergie résiduelle, chaque capteur calcule un temps d'attente $T_{decision} = \alpha * (1 - p) + E$, où p est le niveau d'énergie résiduelle, α est un nombre réel positif et E est un nombre aléatoire uniformément distribué dans $[0, X]$. Lorsque son temps expire, un capteur se met en état actif ou inactif en vérifiant si sa zone de capture est couverte par ses voisins actifs. Si un capteur décide de passer à l'état ACTIF, il doit diffuser un message TURNON comprenant son identification, ses coordonnées, et son rayon de capture RCap.

Dès réception de ce message TURNON par les voisins actifs, ces derniers doivent rajouter l'identification de l'expéditeur à la liste et stocker ses coordonnées et son rayon de captage RCap. Cette phase de décision dure $(\alpha + \gamma)$ unités de temps.

La phase d'optimisation

Après la phase de décision, on peut avoir des capteurs actifs qui engendrent une redondance. Pour éliminer cette redondance, chaque capteur actif débute la phase d'optimisation, juste après la phase de décision, en calculant un $T_{opt} = \alpha * p + E$. Le capteur vérifie sa redondance par l'utilisation de la liste des voisins enregistrés localement, il passe à l'état inactif et émet un message TURNOFF vers ses voisins actifs si ce noeud est redondant. Dès la réception du message TURNOFF, le voisin actif supprime l'identifiant de l'expéditeur de sa liste. La phase d'optimisation dure également $(\alpha + \gamma)$ unités de temps.

Discussions

Les capteurs actifs ont un niveau d'énergie résiduelle plus élevé, et donc la chance de les mettre à l'état passif est faible. Ainsi, SCOM équilibre la charge de travail entre les capteurs pour fournir une couverture totale.

Lors d'une défaillance d'un noeud capteur ou la perte d'un message TURNOFF (à cause d'une collision), l'identifiant du capteur reste présent dans les tables des voisins et sera considéré lors des évaluations de la couverture, ce qui conduira à des erreurs de décision.

Dans les réseaux denses, les enregistrements des messages reçus des voisins peuvent engendrer et conduire à une saturation de la mémoire des capteurs ayant un temps d'attente élevé.

2.2.2.3 L'algorithme A1 pour le contrôle de la topologie

Sajjad et al [36], ont proposé un algorithme distribué pour le contrôle de la topologie dans les réseaux de capteurs sans fil. L'algorithme A1 permet d'obtenir une meilleure connectivité en cours de maintenance de la topologie et fournit également une meilleure couverture.

Description de l'algorithme A1

Cet algorithme se déroule en une seule phase, il construit une topologie connectée à partir d'un ensemble de nœuds actifs pour former un squelette virtuel. Ce squelette sera noté par la suite CDS (pour Connected Dominating Set). L'algorithme A1 utilise deux critères pour la sélection des nœuds actifs, le premier est l'identifiant du père (noté par la suite IDparent) des différents nœuds tant dit que le deuxième est le délai d'attente (ou time-out) calculé par la formule suivante :

$$T_{d,S} = (E_d / E_i) + (RSSS / RSSC) \quad (2.2)$$

tel que d et s représente le nœud fils et le nœud parent respectivement, E_d est le niveau d'énergie restante du nœud fils et E_i est le niveau d'énergie initial. De même, RSSS est la puissance du signal du nœud parent reçu par les nœuds fils et RSSC est la puissance du signal minimum requis pour assurer la connectivité.

De cette manière, les nœuds se mettent en veille et répètent le processus après l'expiration du délai d'attente afin d'élire les nœuds actifs. A la fin, une topologie réduite est formée tout en maintenant le réseau connecté et la zone totalement couverte.

Le fonctionnement de l'algorithme A1

Au début, le nœud initiateur découvre son voisin. De même, les voisins du nœud initiateur découvrent leurs voisins quand leurs délais d'attente expirent. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la topologie complète soit formée avec des nœuds agissant en tant que squelette virtuel (Connected Dominating Set). pour le reste des nœuds du réseau.

La construction de la topologie réduite formée avec l'algorithme A1 est décrite en détails dans l'exemple suivant :

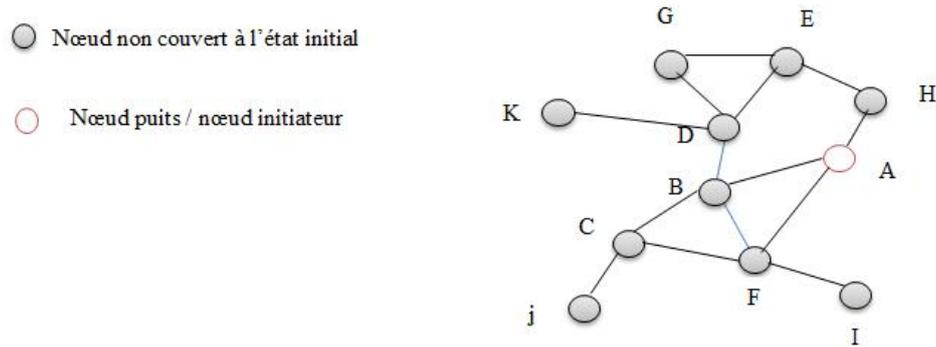


FIGURE 2.3: Protocole A1 : exemple de topologie - état initial.

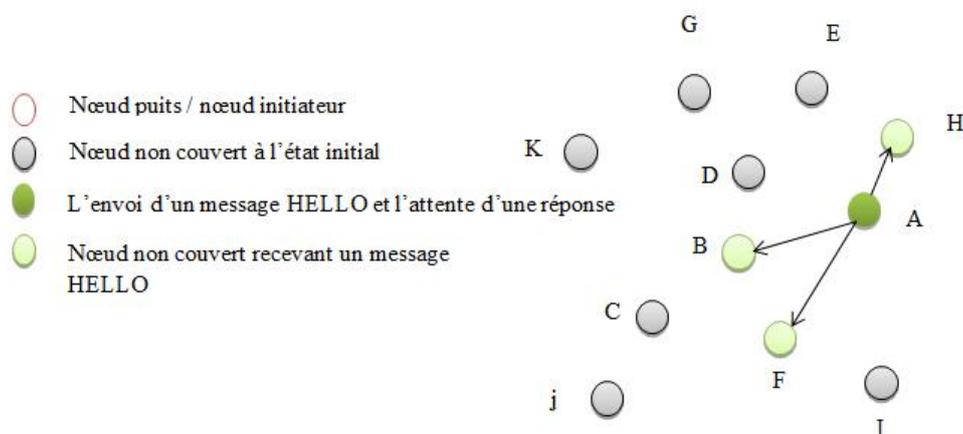


FIGURE 2.4: protocole A1 : exemple de topologie - étape 1.

Le noeud A (noeud initiateur) diffuse un message HELLO vide, il sera reçu par les noeuds B, F et H car ils se trouvent dans sa zone de communication. Après avoir reçu un message HELLO, les noeuds B, F et H calculent leurs timeout en fonction de l'énergie et de la puissance du signal des noeuds émetteur et récepteur.

Lorsque le timeout de B, H et F expire, chaque noeud envoie à son tours un message HELLO à des instants différents après avoir mis le champ IDparent à A. Grâce à cet identifiant le capteur A reconnaît ses fils, il se met alors en mode actif et devient un noeud parent. Les noeuds B et F qui sont à portée, apprennent qu'ils ont le même noeud parent.

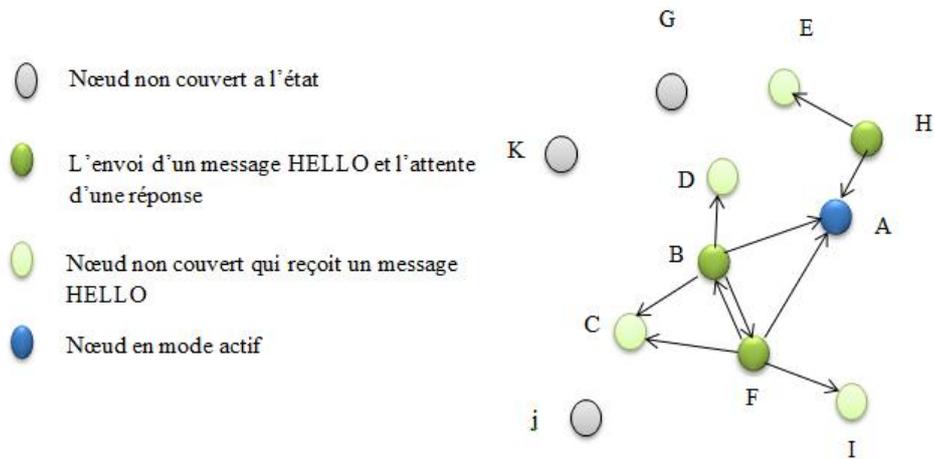


FIGURE 2.5: protocole A1 : exemple de topologie - étape 2.

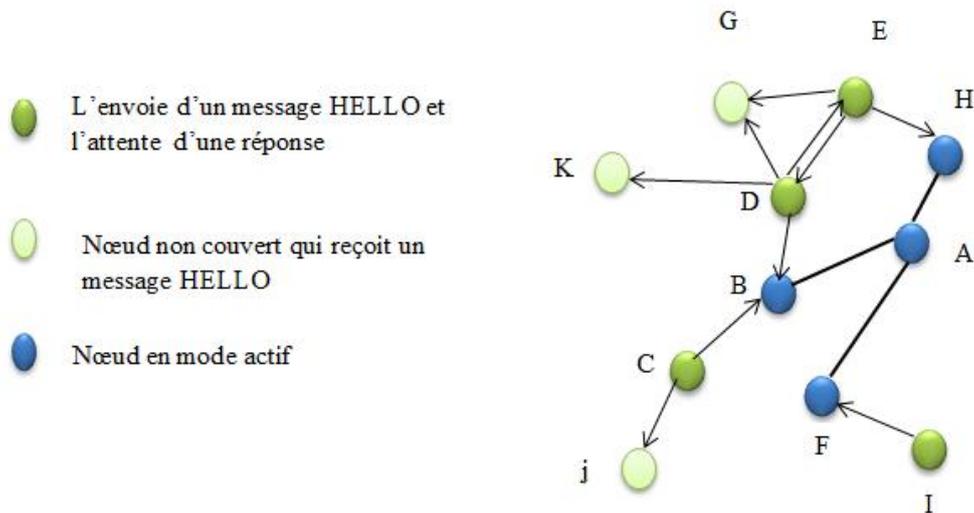


FIGURE 2.6: protocole A1 : exemple de topologie - étape 3.

Après la réception des messages HELLO, les noeuds D et C choisissent le noeud B comme noeud parent, le noeud I choisit le noeud F comme noeud parent. De même, le noeud E choisit le noeud H comme son noeud parent.

Les noeuds G et K diffusent un message HELLO avec ID parent mis à D. De même le noeud J émet HELLO avec ID parent mis au noeud C. Les Timeout de E et I expirent alors qu'ils ne reçoivent aucun message HELLO avec un ID égale à leurs ID, donc ils se considèrent comme des noeuds dominés et se mettent en mode veille.

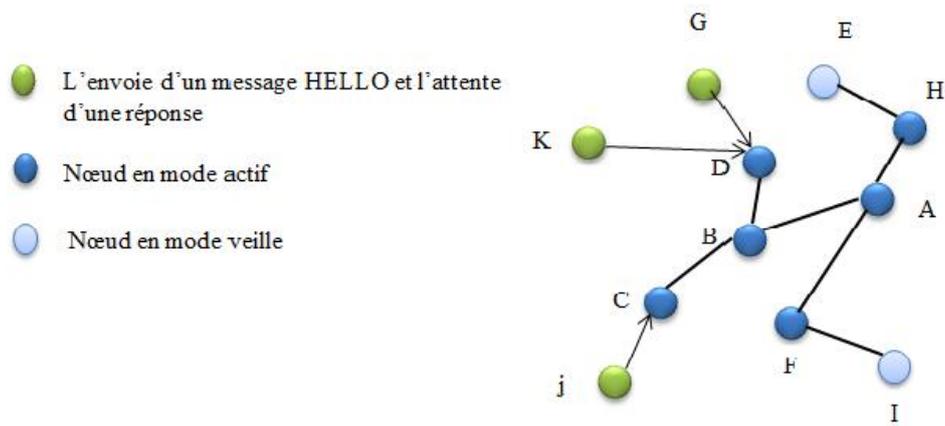


FIGURE 2.7: protocole A1 : exemple de topologie - étape 4.

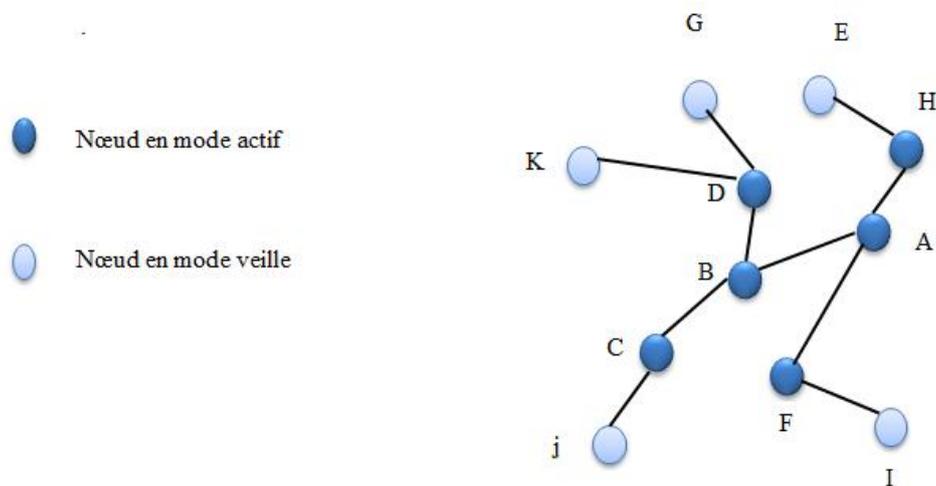


FIGURE 2.8: protocole A1 : exemple de topologie - étape 5.

Les nœuds G, K et J ne reçoivent aucun message HELLO avec l'ID parent égal à leurs ID, donc ils se considèrent comme des nœuds dominés et se mettent en veille pour former la topologie finale réduite.

Discussions

L'algorithme proposé permet d'obtenir une topologie réduite du réseau, donc il permet à quelques nœuds d'être actifs tandis que d'autres se mettent en veille. Ceci en assurant la couverture de la zone d'intérêts ainsi que la connectivité.

Dans le protocole A1, tout nœud recevant le message HELLO le rediffuse à son tour, ce qui conduit à une consommation importante d'énergie, et donc une dégradation de la durée de vie du réseau.

2.2.2.4 Le protocole triangulaire pour la couverture totale et l'élimination des trous de couverture

Wi et al. [37] ont proposé un protocole triangulaire afin de déterminer les noeuds actifs pouvant assurer la couverture totale par le biais d'un mécanisme d'auto-test triangulaire. Cette approche est indépendante des positions des noeuds dans la zone à surveiller, elle se base sur la sélection d'un ensemble de noeuds actifs. Elle peut assurer la couverture totale de la zone d'intérêts.

Les auteurs ont supposé que les capteurs sont équipés d'antennes omni-directionnels permettant de mesurer la distance entre les noeuds par la force du signal reçu. Ils supposent également que le rayon de communication R_{Com} est au moins trois fois plus grand que le rayon de captage R_{Cap} .

Description du protocole

La solution proposée est composée de deux phases. Dans la première un ensemble initial de noeuds actifs est déterminé. La deuxième phase est dédiée à la détection des trous de couverture dans la zone d'intérêt.

La première phase

Initialement tous les noeuds sont inactifs, et chacun calcule un temps d'attente (ou un back-off). Après l'expiration du temps d'attente, un noeud devient actif et vérifie s'il existe un noeud actif dans sa zone de captage ou non. S'il n'existe aucun noeud, il devient un nouveau noeud actif. Autrement, le noeud devient inactif pendant une période de temps pour la construction de la table des voisins en se basant sur des messages de contrôle. Cette table inclue l'ID du noeud et la distance le séparant de tous ses voisins à un saut est à deux sauts.

La table construite servira d'entrée pour la deuxième phase pour la détection des trous de couverture. Quand cette phase est achevée, un premier ensemble de noeuds actifs est découvert.

La deuxième phase

Dans cette phase un auto-test triangulaire est exécuté par chaque noeud inactif afin d'éliminer tous les trous de couverture. Pour chaque noeud inactif, un triangle est formé en se basant sur les trois voisins actifs les plus proches.

Des coordonnées relatives sont assignées aux points finaux du triangle, suivi du calcul des coordonnées du centre du triangle. Basé sur la distance séparant le centre et les points finaux du triangle, et en les comparant au rayon de captage, les trous de couverture sont déterminés. Si le résultat de ce test est positif, le noeud concerné devient actif pour éliminer ce trou de couverture.

Discussion

Ce protocole n'utilise pas les positions géographiques des noeuds, donc il ne génère pas de coûts supplémentaires induit par les GPS, ni les erreurs engendrées par les protocoles de localisation. De plus, les résultats de simulation ont montré que ce protocole est scalable même si la densité des noeuds augmente.

Il y a quelques facteurs réels qui peuvent affecter l'efficacité de la mesure de distance basée sur la force de signal reçu, ceci diminue les performances du mécanisme d'auto-test triangulaire.

D'ailleurs, la solution proposée suppose que le rayon de transmission devrait être au moins trois fois plus grand que le rayon de couverture ce qui limite l'applicabilité de la solution.

2.2.3 Les protocoles hiérarchiques

2.2.3.1 Protocole basé sur l'inondation

VTran-Quang et T.Miyoshi. [38] ont proposé MSCR-LEACH (Maximum Sensing Coverage Region-Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), un algorithme basé sur l'identification des noeuds redondants qui doivent être mis en mode inactif à condition que la zone de captage soit suffisamment couverte par leurs voisins actifs. Ce protocole est une amélioration du protocole de routage pour les réseaux de capteurs hiérarchiques LEACH [39], son objectif est d'étendre la durée de vie du réseau et ce en minimisant la consommation d'énergie sur chaque noeud.

Les auteurs ont supposé un réseau composé de capteurs homogènes et statiques déployés en forte densité dans une zone à surveiller, chaque noeud connaît ses coordonnées géographiques et celles de ses voisins ainsi que l'emplacement de la station de base, d'où ces informations sont obtenues par l'envoi de messages HELLO. Le rayon de communication R_{Com} est supposé être deux fois plus grand que le rayon de couverture R_{Cap} . Les capteurs sont synchrones, et chaque noeud peut connaître son énergie à un moment donné.

Description du protocole MSCR

Le problème de MSCR consiste à assurer la couverture totale d'une zone d'intérêt avec un nombre minimum de capteurs, et ce en mettant à l'état passif les noeuds redondants. Le processus d'inondation utilise des messages afin de permettre à chaque capteur de connaître ses voisins. Ensuite, à travers cette information de voisinage, chaque noeud décide de son état en exécutant l'algorithme MSCR décrit ci-dessous.

L'algorithme MSCR

Un noeud capteur est redondant si sa zone de détection est k -couverte (k est le degré de couverture) par ses voisins en vérifiant les deux conditions suivantes :

1) Condition nécessaire : soit un capteur S_i , l'ensemble des voisins, nommé $O(S_i)$ est créé par l'intersections des frontières. On dit que le capteur S_i est entièrement k -couvert si et seulement si $Uarc_j \geq 2k\pi$ quelque soit $j=1\dots|O(S_i)|$, tel que k est un nombre naturel fourni par l'ensemble des voisins et arc_j est la valeur de l'angle 2α illustré dans la figure 2.9.

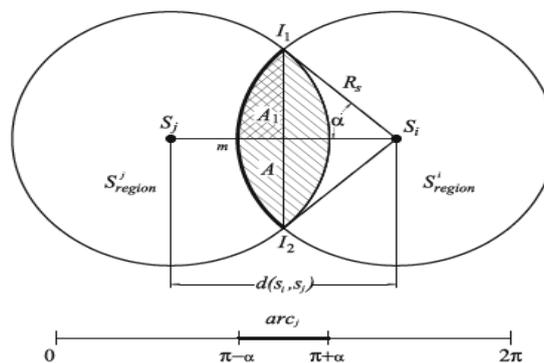


FIGURE 2.9: L'arc frontière créé par le l'intersection de deux capteurs et la transformation de l'angle dans l'intervalle $[0, 2\pi]$.

2) Condition suffisante : la distance euclidienne entre le noeud S_i et l'ensemble des voisins $O(S_i)$, doit être inférieure au rayon de couverture $RCap$ du capteur S_i , c.à.d $d(S_i, S_j) \leq RCap$ pour tout $S_j \in O(S_i)$.

Pour l'activé, les capteurs qui envoient des messages sont considérés comme noeuds actifs. Chaque noeud S_i connaît l'ensemble de ses voisins $O(S_i)$ aux quel il envoie un message d'inondation. Après un temps d'attente, le noeud reçoit des réponses aux messages envoyés. Le noeud S_i calcule alors les arcs frontières avec ses voisins et les transforme en angle dans l'intervalle $[0,$

$2\pi]$. En vérifiant les conditions 1 et 2, le noeud Si détermine s'il est redondant ou pas. Si tel est le cas, il envoie un message passif, sinon un message actif.

Fonctionnement du protocole MSCR-LEACH

Le fonctionnement du protocole MSCR-Leach est organisé en périodes. Chacune commence par une phase de configuration suivie d'une phase stationnaire.

Phase de configuration

Cette phase permet aux capteurs d'échanger les informations nécessaires à l'exécution du protocole, telles que l'identité du capteur, sa position géographique et son énergie résiduelle. Chaque noeud vérifie s'il peut devenir un cluster-head en fonction de sa quantité d'énergie restante. Pour cela, les noeuds ayant plus d'énergie deviennent un cluster-head.

Lors de la détermination du cluster-head, ce dernier diffuse un message à tous ses voisins pour les informer qu'il a été élu comme étant "un nouveau cluster-head". Une fois que les capteurs aient reçu le message d'information, ils déterminent le cluster auquel ils appartiendront durant cette période. Pour les noeuds qui reçoivent plusieurs messages, la décision d'adhérence à un cluster repose sur la puissance du signal reçu à travers le cluster-head, et sur la base des exigences de l'application (par exemple, surveillance de la zone, la connectivité, etc).

L'exécution de l'algorithme MSCR permet à une partie des membres de chaque cluster d'être inactif tandis que les autres restent actifs. Chaque capteur envoie son statut actuel à son cluster-head. Une fois que tous les noeuds décident de leurs appartenances à un cluster, chaque cluster-head établit un planning, puis l'envoie aux membres de son groupe. Ce planning permet aux noeuds d'être en veille sauf au moment de la transmission. Ainsi, cette méthode minimise l'énergie consommée.

Phase stationnaire

Au cours de cette phase, les noeuds actifs peuvent commencer la surveillance de l'environnement et transmettre les données captées à leur cluster-heads. Ces derniers reçoivent des données de leurs membres actifs, ils effectueront des fonctions de traitement de signal sur les données reçues (par exemple, l'agrégation des données), puis les transmettront vers la station de base.

Après une certaine période de temps passé dans la phase stationnaire, le réseau se met en phase d'installation à nouveau et commence une autre série d'activité.

Discussion

Les résultats de simulation confirment la réduction de consommation totale d'énergie dans l'ensemble du système qui permet d'étendre la durée de vie du réseau.

Dans le cas où deux noeuds voisins, ayant des temps d'attente sont égaux, décident d'être en veille simultanément, un trou de couverture apparait. Ce type de protocoles nécessite des capteurs puissants en terme de capacité de stockage et de calcul. Alors, dans un cluster le nombre de noeuds actifs peut être important, et l'envoi des messages vers les clusters-heads peut provoquer une saturation de mémoire.

2.2.3.2 Protocole d'ordonnement basé sur l'ensemble dominant

K.P. Sampooram et K. Rameshwaran [40], ont proposé une solution au problème de couverture, basée sur une formulation en théorie des graphes. Le principe de cette solution, consiste à ordonner les noeuds actifs en se basant sur le concept des ensembles dominants de cardinalité minimale. Le but est d'éliminer la redondance tout en maintenant la couverture totale de la zone d'intérêt.

Description de l'algorithme

L'objectif principal de l'algorithme est de combiner les caractéristiques des ensembles dominants (Connected Dominating Set) [41] avec l'algorithme d'ordonnement des noeuds actifs. Cet algorithme s'exécute en deux étapes préliminaires : la première est la génération des arbres couvrants tandis que la deuxième étape est la collecte de données ainsi que la maintenance des chemins vers la station de base. Dans la seconde étape, les noeuds dans l'arbre couvrant est le résultat de la première étape formant un ensemble dominant connecté. Le noeud racine est élu pour sa capacité énergétique élevée.

Le rôle d'un noeud capteur est d'intercepter périodiquement les données dans son environnement et d'enregistrer son énergie afin de les envoyer vers le noeud racine dans un mode round robin où la racine achemine les données vers la station de base. Ce processus de collecte de données est répété autant de fois dans les périodes. Afin de maintenir les routes, le capteur diffuse un paquet DECOUVERTE-ROUTE avec une nouvelle séquence d'identifiant.

La solution proposée est la combinaison entre la planification des noeuds actifs et l'ensemble dominant connecté (CDS). L'ordonnement des noeuds actifs effectue efficacement le routage et le maintien de la couverture tout en assurant la connectivité vers la station de base. La description de l'ordonnement est comme suit :

Le mode d'ordonnement des noeuds actifs se fait d'une manière synchronisée. Il maintient également une épine dorsale composée de noeuds actifs qui fournissent des données vers des noeuds inactifs au moment de leur activation et ce à cause du retard de communication entre les deux noeuds dans la période d'activité, ainsi les noeuds collectent des requêtes et les diffusent à leurs voisins afin de créer un arbre de routage vers la station de base.

L'ensemble des voisins calculent la distance les séparant du noeud racine, puis ils calculent un temps début T_{debut} et un temps fin T_{fin} ainsi que l'angle θ entre le noeud racine et le noeud n en déterminant la vitesse instantanée v . Le noeud n teste son temps début, s'il est égal au temps où le noeud est passif $T_{debut} = \text{temps minimum sommeil}$ alors le capteur décide de passer en état passif, sinon il reste actif et réinitialise son T_{debut} . Les noeuds dont l'état actif collectent des données durant leur temps d'activité et les envoient à travers l'arbre créé précédemment.

Discussions

Cet algorithme d'ordonnement donne de meilleures performances dans le cas des réseaux denses. Ainsi il économise de l'énergie et étend la durée de vie du réseau. Il permet d'obtenir une topologie réduite du réseau en combinant l'algorithme de l'ensemble dominant (CDS) avec l'ordonnement des noeuds actifs.

2.2.3.3 Protocole basé sur le clustering

Z. Liu et al [42] ont proposé DEECIC (pour Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage), un algorithme basé sur le clustering et l'identification des noeuds de manière unique. Ce protocole effectue des mises à jour périodiques des cluster-heads en fonction de l'énergie résiduelle des noeuds. L'algorithme proposé, prolonge la durée de vie du réseau en améliorant sa couverture d'une manière efficace.

Dans cette solution, les auteurs ont supposé que les capteurs, déployés aléatoirement dans une région à surveiller, sont dans l'état actif pendant l'exécution de l'algorithme. Les cluster-heads ne sont pas nombreux, ils consomment une grande quantité d'énergie lors du traitement et le transfert des données à la station de base.

La communication des noeuds à deux sauts avec leur cluster-head est effectuée à travers un intermédiaire qui fournit un service de relais, les noeuds sont statiques, asynchrones dans le temps et n'utilisent pas de GPS ou tout autre mécanisme pour la détermination de leur emplacement.

Description de l'algorithme

Dans ce protocole, les noeuds C_i utilisent la notion de voisinage par la fonction $NodeDegree(C_i)$.

Un noeud C_u est considéré comme un voisin d'un noeud C_v si et seulement si C_u se trouve dans la portée radio de C_v , où C_u et C_v appartiennent à l'ensemble des noeuds du réseau S . Nous définissons la fonction $NodeDegree(C_v)$ qui détermine le nombre total de voisins du noeud C_v , par :

$$NodeDegree(C_v) = count(C_u | dist(C_v, C_u) < R_{Com}, C_u \in S, C_u \neq C_v)$$

Le processus de regroupement utilise quatre types de messages définis comme suit :

Msg-Degré : chaque capteur envoie à ses voisins son degré calculé par la fonction $NodeDegree$ utilisé dans la phase de formation de cluster ou dans la phase de migration de cluster-head.

Msg-Etat : tout capteur transmet son état à ses voisins.

Msg-Rejoindre : tout capteur non groupé envoie ce message au cluster-head, afin d'être un noeud membre à 1-saut ou à 2-sauts.

Msg-Renoncer : ce message est envoyé par un cluster-head afin d'informer ses membres qu'il ne pourra pas assurer le rôle de cluster-head.

Cet algorithme a deux phases principales, la phase de formation des clusters et la phase de migration des clusters-head.

Phase de formation des clusters

Après la réception du message d'initialisation de la station de base, chaque noeud diffuse un paquet hello de mise à jour à tous ses voisins pour les informer de son existence. Afin de réduire les collisions dues à la diffusion, l'envoi est prévu après un temps d'attente aléatoire.

Chaque noeud calcule son degré par la fonction $NodeDegree$ en fonction des paquets reçus. En plus, le noeud C_u diffuse un MSG-DEGRÉ après l'expiration d'un temps d'attente tiré aléatoirement entre T_{max} et $T_{max} + T_{C_u}$, tel que $T_{C_u} = \alpha * e^{-1/NodeDegree(C_u)}$ ou α est une constante donnée.

Tout noeud doit attendre l'expiration de son délai d'attente pour prendre la décision. S'il a le plus grand degré parmi ses voisins, il représente un cluster head, et il envoie un MSG-ETAT à tous les noeuds dans son rayon de communication.

Si un noeud n'appartient à aucun cluster, et reçoit un MSG-ETAT d'un cluster-head, ce noeud doit choisir aléatoirement un nombre entier de 2 octets et le concatène à la fin de l'identifiant du cluster-head, le résultat représente alors son propre identifiant. Ensuite, le capteur envoie un MSG- REJOINDRE au cluster-head en lui indiquant qu'il est voisin à 1-saut. A la fin de cette phase, le nombre de clusters formés est minimal, la couverture totale de la zone d'intérêt est maintenue, chaque noeud possède un identifiant unique et a la connaissance de son cluster-head.

Phase de migration de cluster-head

Une fois que les clusters sont formés, chaque noeud membre à 1-saut construit une liste d'identifiants des membres et la stocke localement, puis la transmet au cluster-head afin que ce dernier ait une connaissance de ses membres. Au cours de cette période, les noeuds membres surveillent la zone d'intérêt et transmettent les données collectées à leur cluster head, celui-ci effectue l'agrégation et le filtrage des données reçues puis les transmet à la station de base. Si l'énergie du cluster-head est inférieure à un seuil prédéfini alors il diffuse un MSG-RENONCER à ses membres afin de les informer qu'il n'est plus un cluster head. Le message contient son identifiant et son seuil d'énergie.

Lors de la réception de ce message par les membres du cluster, ils changent leurs états, ils deviennent non groupés. Au cours de cette période, les noeuds diffusent un MSG-ETAT ainsi que les messages reçus de leurs voisins, chaque noeud enregistre le nombre de messages reçu en effectuant un tri sur les noeuds non groupés afin d'établir une décision d'élire un nouveau cluster-head. Un seul noeud sera élu comme un cluster-head pour le prochain tour.

Discussion

Cet algorithme prolonge la durée de vie du réseau en améliorant la qualité de couverture en comparaison avec les deux protocoles EECF [43] et LEACH [39].

Ce type de protocole nécessite des capteurs puissants en termes de capacité de stockage et de calcul. Ceci car, dans un cluster le nombre de noeuds actifs peut être important, et l'envoi de messages vers les clusters heads peut provoquer la saturation de leur mémoire. Ce protocole nécessite une phase de découverte de voisins à deux sauts ce qui induit un coût de communication élevé.

Afin d'acheminer les données captées par les membres à deux sauts vers les clusters heads, il est nécessaire de transmettre les données collectés au préalable aux membres du cluster a un saut, ceci peut consommer une quantité importante d'énergie et par conséquent affaiblir les membres à un saut des clusters.

2.3 Comparaison des protocoles de couverture de surface

Il existe plusieurs critères qui peuvent être utilisés pour comparer entre les protocoles de couverture de surface. Dans le tableau ci-dessous, nous comparons les protocoles étudiés précédemment selon quelques critères que nous avons jugé les plus importants.

2.3.1 Connaissance des positions géographiques

La connaissance des positions peut induire à des coûts supplémentaires au niveau production et consommation d'énergie, et cela par l'addition d'un dispositif de localisation.

2.3.2 Clustering

Le clustering consiste en un découpage virtuel du réseau en groupes de noeuds proches géographiquement. Ces groupes sont appelés clusters, ils sont construits à partir d'une métrique particulière qui permet d'assigner un chef à chaque cluster. Les avantages du clustering est de faciliter le routage et minimiser la quantité du trafic généré lors de l'acheminement des données vers la station de base. Outre le fait de rendre le routage plus efficace, le clustering présente également d'autres avantages. Ils peuvent faciliter le partage des ressources et/ou la synchronisation au sein d'un cluster et de permettre une réutilisation spatiales des fréquences radio pour minimiser les interférences [44].

2.3.3 Inondation du réseau

L'inondation du réseau par des messages hello génère un coût de communication élevé, ce qui augmente la consommation d'énergie.

2.3.4 Equilibrage de la consommation d'énergie

Les protocoles gérant les capteurs avec équilibrage d'énergie, sont plus susceptibles de prolonger la durée de vie du réseau, car certaines batteries dont l'énergie est consommée en équilibrant les charges des capteurs durent près de deux fois le temps que lorsqu'elles sont déchargées en continu [45].

2.3.5 La phase de découverte des voisins

Cette phase engendre généralement un coût de communication élevé, ce qui est un inconvénient pour les réseaux très dense. Néanmoins cette phase est nécessaire pour le fonctionnement de quelques protocoles tels que les protocoles de routages, où la découverte des voisins ou la connaissance de la topologie du réseau est exigée.

2.3.6 Type de protocole

Il existe trois types de protocole : les protocoles centralisés, hiérarchiques et distribués. Dans les approches distribuées, chaque capteur collecte des informations de ses noeuds adjacents. Puis, il détermine son statut de manière autonome. Alors que dans les approches centralisées, une entité centrale appelée station de base recueille les informations des noeuds et décide de l'état de chacun d'entre eux. Tandis que dans un protocole hiérarchique, les informations de changements de topologie ne sont propagées qu'au sein des sous-structures.

Critères Protocoles	Connaissance des positions	Phase de découverte des voisins	Type de protocole	Homogénéité des capteurs	Équilibrage de charge	Inondation
TTS[29]	Oui	Non	Centralisé	-	Oui	Non
Protocole basé sur les EDMs[30]	-	Oui	Centralisé	-	Oui	Oui
Protocole basé sur une heuristique[31]	Oui	Non	Centralisé	Oui	Oui	Non
1-CP[33]	Oui	Non	Distribué	-	Oui	Non
SCOM [35]	Oui	Non	Distribué	-	Oui	-
A1 [36]	Non	Oui	Distribué	-	Non	Oui
triangulaire [37]	Non	Oui	Distribué	-	Non	Oui
MSCR-LEACH [38]	Oui	Non	Hiérarchique	Oui	Oui	Oui
Protocole basé sur CDS [40]	Non	Non	Hiérarchique	-	Oui	Oui
DEECIC [42]	Non	Non	Hiérarchique	-	Oui	-

TABLE 2.1: tableau comparatif des protocoles de couverture de surface étudiés

2.4 Conclusion

La couverture est un problème fondamental ayant un grand impact sur la contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Il existe plusieurs protocoles de couverture qui ont été proposés dans la littérature. Ces protocoles peuvent être classifiés selon l'approche utilisée en protocoles centralisés, distribués ou hiérarchiques. Généralement, ces protocoles se focalisent sur le maintien de la couverture totale tout en minimisant la consommation d'énergie afin d'étendre la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art des principales approches proposées pour résoudre le problème de la couverture de surface dans les RCSFs. En outre, nous avons classifié ces approches selon plusieurs critères : la connaissance de positions, l'équilibrage de charge, type de protocole et la notion d'inondation. Il sera question dans le chapitre suivant, de présenter le protocole proposé qui maintenant la couverture dans les réseaux de capteurs.

Protocole de clustering pour le maintien de la couverture.

Sommaire

3.1 Introduction	55
3.2 Motivations	56
3.3 Préliminaires	56
3.4 Protocole de clustering pour le maintien de la couverture : ECCoM	57
3.5 Exemple d'application du protocole de clustering	65
3.6 Conclusion	79

3.1 Introduction

L'ordonnancement d'activité consiste à mettre dans l'état passif alternativement les capteurs redondants (qui surveillent la même portion de la zone de déploiement) issus de la forte densité du réseau. Cette mise en veille a pour objectif d'économiser l'énergie des capteurs et, par conséquent, étend la durée du réseau.

Dans ce chapitre, nous présentons un protocole distribué ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance) basé sur le clustering, pour le maintien de la couverture dans les réseaux de capteurs homogènes. En effet, l'élection des clusters head se base sur un temps d'attente calculé en fonction du pourcentage d'énergie résiduelle et du degré des noeuds. Après avoir élu les clusters-heads, les membres des clusters sont ordonnancés pour assurer la couverture totale de la zone d'intérêt. Notre approche divise la durée de vie du réseau en période d'activité. Pour équilibrer la charge entre les clusters, une élection des clusters heads est effectuée au début de chaque période d'activité.

3.2 Motivations

Le déploiement aléatoire des capteurs, est le plus utilisé pour de nombreuses applications dans des environnements généralement inaccessibles par les humains. Pour cette raison, les noeuds capteurs sont déployés en forte densité afin d'éviter des trous de couverture (portions non couvertes de la zone de déploiement) qui dégradent la fiabilité du réseau.

De ce fait, les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants ; à tout moment il existe des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement. Lorsqu'un événement se produit sur cette dernière, il est inutile d'avoir un nombre élevé de capteurs qui le reporte. Il est donc crucial d'ordonnancer l'activité des capteurs dans le but d'économiser l'énergie des capteurs et d'étendre la durée de vie du réseau. En effet, certains noeuds sont passifs à un instant donné, les rôles sont plus souvent alternés de façon à ne pas toujours pénaliser les mêmes capteurs du réseau.

L'ordonnancement d'activité est l'une des techniques utilisées par les protocoles de couverture, il permet de réduire la redondance des capteurs. Ordonnancer l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser l'énergie des noeuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les autres sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie. Par ailleurs le clustering consiste à regrouper un certain nombre de capteurs, généralement dans un voisinage géographique, pour former un cluster. En utilisant une approche de clustering, les capteurs sont gérés localement par un cluster head (noté CH) qui est aussi responsable de la communication entre le groupe et la station de base [46].

Dans les protocoles de couverture basés sur le clustering, l'activité des membres de clusters, est ordonancée de façon à ce que les membres actifs soient capables de surveiller une zone aussi large que celle couverte par l'ensemble des capteurs déployés. Nous souhaitons donc ordonnancer l'activité des membres de clusters suivant le critère de la couverture.

3.3 Préliminaires

3.3.1 Modèles de capture et de communication

Considérons un réseau sans fil où tous les noeuds coopèrent dans le but d'assurer des communications. Ce réseau est représenté par un graphe connexe $G = (N, A)$, N est l'ensemble des sommets (capteurs) et A celui des arcs. Un capteur est caractérisé par deux rayons différents : l'un pour la couverture de la zone (noté $RCov$) et l'autre pour la communication avec les autres noeuds (noté $RCom$).

La surface couverte par un capteur c (appelée zone de perception ou de surveillance), est représentée par un cercle de rayon $RCov$ centré en c . La zone de perception est la zone à l'intérieur de laquelle si un événement se produit, il sera perçu par le capteur c .

De même, la zone de communication d'un capteur c , est modélisée par un cercle de rayon $RCom$ centré en c , à l'intérieur de laquelle le capteur peut transmettre et recevoir des messages. Par conséquent, les voisins de c sont les capteurs dont la distance les séparant de c est inférieure ou égale à $RCom$.

3.3.2 Hypothèses

Le protocole proposé pour le problème de la couverture se base sur le clustering, il est nommé ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance). Il repose sur les hypothèses suivantes :

Les capteurs sont déployés en forte densité dans la zone à surveiller, et ce pour garantir initialement la couverture totale de cette zone. Ces capteurs sont statiques et homogènes (en termes de capacités de capture et de communication) et chacun peut connaître le niveau de son énergie à un instant donnée. Les capteurs sont synchrones, ce qui leur permettra de commencer une nouvelle période et au même moment.

Le protocole ECCoM est libre de positions, il ne requiert pas l'utilisation du GPS (Global Position System) [46] ou l'application d'une technique de localisation [47, 48, 49] permettant d'obtenir les coordonnées géographiques des capteurs.

3.4 Protocole de clustering pour le maintien de la couverture : ECCoM

3.4.1 Principe de base du protocole

Le protocole ECCoM est une solution distribuée pour le maintien de la couverture dans un réseau de capteurs homogène. Il se base sur le clustering, et exploite la forte densité par l'ordonnancement d'activité visant à mettre en veille les capteurs redondants. Cette mise en veille à un double objectif ; économiser l'énergie et minimiser les problèmes liés à la gestion d'une large population d'objets partageant un medium, tel que l'air.

Le principe de notre contribution est tiré du protocole DEECIC (pour Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage) [42]. Ce dernier est basé sur la technique du clustering dont le but est d'équilibrer la charge des noeuds du réseau et d'assurer la couverture de la zone d'intérêt, il utilise le critère du degré des noeuds pour la sélection des clusters heads, ne

procède à aucun ordonnancement d'activité des noeuds membres afin de réduire la redondance, et ne tient pas compte de l'énergie des capteurs.

A partir de ce constat, nous avons proposé une solution ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance) où nous avons ajouté (au protocole DEECIC) le critère de l'énergie résiduelle dans le choix des clusters heads, ceci car l'énergie est la contrainte la plus critique dans les réseaux de capteurs. En outre, nous avons introduit l'ordonnancement d'activité des membres de clusters afin de minimiser la redondance, tout en assurant la couverture totale de la zone de surveillance.

3.4.2 Caractéristiques du protocole

La solution proposée est caractérisée par : (1) une division de la durée de vie du réseau en périodes d'activité successives et de longeur égales, (2) une décision autonome pour élire un cluster head et ordonnancer l'activité des membres des clusters, (3) un équilibrage de charge entre les clusters heads est obtenu par le choix des noeuds ayant une énergie suffisante pour assurer le rôle du cluster head durant une période d'activité, (4) une consommation d'énergie équitable entre les membres des clusters est réalisée en alternant les noeuds entre les modes actif et passif en fonction de leurs pourcentage d'énergie et leurs degré (nombre de voisins) durant les phases d'activité.

Le protocole ECCoM opère en périodes d'activité. Chaque période est composée de deux phases ; une phase de formation de clusters et d'ordonnancement des membres, et une phase d'activité (capture, agrégation des données par les clusters heads et envoi des données vers la station de base) en passant au préalable par une phase de découverte des voisins à un saut qui se fait une seule fois lors de l'initialisation du réseau.

Au début de chaque période les capteurs exécutent le protocole ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance) afin de prendre leur décision (cluster head, membre actif ou passif). Pour épuiser l'énergie des noeuds équitablement, la décision d'un capteur (c.à.d. être un cluster head ou un noeud membre actif) est basée sur le calcul d'un temps d'attente inversement proportionnel au pourcentage d'énergie résiduelle et au degré. L'utilisation de ce temps d'attente a l'objectif de permettre aux capteurs ayant un pourcentage d'énergie élevé et un degré maximal (et donc un temps d'attente réduit) d'être cluster head ou membres actifs de cluster, le reste des membres sont passifs.

3.4.3 Description détaillée du protocole

3.4.3.1. Les phases du protocole

Dans ce protocole, la durée de vie du réseau est divisée en périodes d'activité (de même longueur). Après une phase de découverte de voisins, chaque période est composée d'une phase durant laquelle des clusters sont formés et les membres de clusters sont ordonnancés, suivie de la phase d'activité.

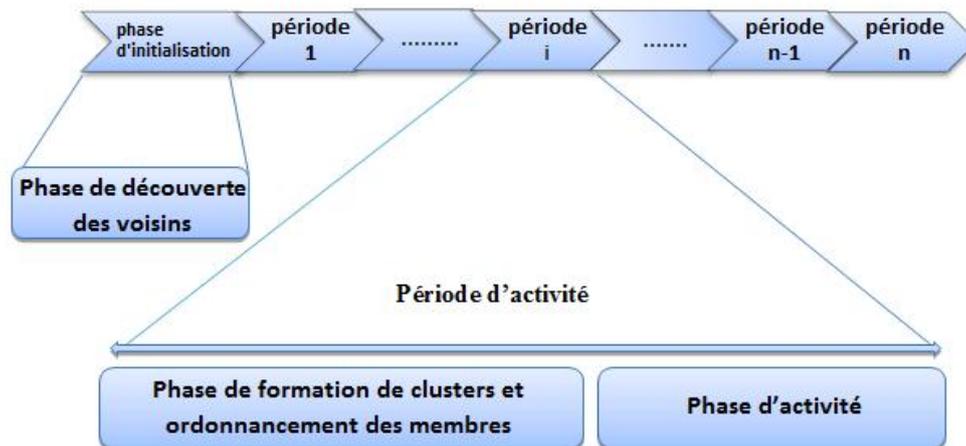


FIGURE 3.1: le protocole ECCoM : divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité.

Les variables qui caractérisent un capteur i sont :

$E_{initiale}$: énergie initiale, elle est la même pour tous les noeuds,

EC_i : énergie courante ou résiduelle, initialement elle est égale à $E_{initiale}$,

PER_i : pourcentage de l'énergie résiduelle,

Dgr_i : est le nombre de voisins à un saut,

S_i : est une valeur aléatoire générée dans l'intervalle $[0, 0.01]$. Elle est ajoutée au temps d'attente pour éviter la décision simultanée des capteurs ayant la même valeur pour les deux autres facteurs (énergie résiduelle et degré),

$T_{attente}$: délai d'attente,

$Etat_i^p$: l'état du capteur i à la période p . Initialement tout capteur i est en état d'écoute, à l'expiration du temps d'attente sans recevoir de message "head" ou "join", l'état du capteur devient Cluster Head. Dans le cas où le capteur i reçoit uniquement un message "head", sans la réception d'un message "join", il sera à l'état actif. Dans le cas où un noeud i recoit un message "join" il se met à l'état passif.

Les fonctions utilisées par un capteur "i" sont :

- **Envoyer (hello)** : le noeud i envoie à ses voisins directs un message les informant de son existence.
- **Réception (hello)** : le noeud i reçoit le message d'information signalant l'existence d'un voisin.
- **Envoyer (msg-head, i)** : suite à sa décision d'être cluster head, le noeud i envoie un message contenant son identifiant afin d'informer ses voisins.
- **Réception (msg-head, j)** : le noeud i reçoit un message du voisin j ayant décidé d'être cluster head.
- **Envoyer (msg-join, idCH)** : suite à sa décision, après l'expiration de son temps d'attente et après avoir reçu un message head, le noeud i envoie un message d'activité.
- **Réception (msg-join, idCH)** : le noeud i reçoit un message d'activité d'un voisin actif. Du coup, il déduit qu'il est membre à deux sauts d'un cluster, il se met donc en mode veille.
- **Envoyer (i, msg-seuil-CH, $E_{seuilCH}$)** : le cluster head envoie un message d'information à ses membres en incluant l'énergie moyenne consommée lors de cette période d'activité.
- **Réception (j, msg-seuil-CH, $E_{seuilCH}$)** : le noeud i reçoit un message d'information $E_{seuilCH}$ du cluster head j.
- **Envoyer (i, msg-seuil-ACT, $E_{seuilACT}$, $E_{seuilCH}$)** : le noeud i envoie un message d'information contenant l'énergie moyenne consommée durant la période d'activité courante ainsi que le seuil envoyé par le cluster head.
- **Réception (j, msg-seuil-ACT, $E_{seuilACT}$, $E_{seuilCH}$)** : le noeud i reçoit un message d'information contenant le seuil du cluster head j ainsi que celui de l'activité du noeud k.
- **Envoyer (msg-défaillant)** : suite à la réception d'un message "msg-seuil-ACT" envoyé par l'un des voisins actifs, le noeud i compare son pourcentage d'énergie avec le seuil d'activité reçu précédemment, si son pourcentage d'énergie est inférieur à ce seuil, il envoie un message informant ses voisins qu'il est défaillant.
- **Réception (msg-défaillant)** : le noeud i reçoit un message d'information d'un de ses voisins défaillant.

Phase 1 : Découverte des voisins

Lors de cette phase, chaque capteur C_i diffuse un paquet "hello" vide afin de signaler son existence et se met en écoute des messages diffusés par ses voisins directs. Chaque capteur C_i pourra calculer son degré Dgr_i qui est alors le nombre de messages "hello" reçu. Un temps aléatoire "t" doit être généré entre $[0, 0.01]$ (ms) par chaque capteurs afin d'éviter les collisions pouvant être engendrées par l'envoi simultané des paquets " hello ".

La phase de découverte est exécutée une seule fois lors de l'initialisation du réseau. À la fin de cette phase, chaque capteur aura un degré représentant le nombre de ses voisins à un saut. Ce degré sera utilisé pour le calcul du temps d'attente.

Le pseudo code suivant présente la phase de découverte des voisins :

Algorithme de découverte de voisins

Debut
 $Dgr_i = 0;$
 // Phase de découverte de voisins
 Générer $t \in [0, 0.01]$
 Envoyer (hello);
 Tantque ($t < T_{max}$) faire
 Lors de réception (hello) Faire
 $Dgr_i++;$
 FinFaire ;
 Fin tantque ;
 // Mise à jour du degré suite à la défaillance d'un voisin
 Lors de la reception (msg_defaillant) Faire
 $Dgr_i--;$
 FinFaire ;
Fin

T_{max} est le temps nécessaire pour recevoir tout les paquets "hello" de tous les voisins.

Phase 2 : formation des clusters et ordonnancement des membres

Cette phase consiste à partitionner le réseau en groupes virtuels, appelés clusters. Le réseau possèdera donc une organisation hiérarchique. Chaque cluster est géré par un cluster-head. Le choix des clusters-heads dépend d'un temps d'attente calculé en fonction de l'énergie résiduelle et du degré (nombre de voisins) du capteur.

Tous les noeuds possèdent la même quantité d'énergie initiale $E_{initiale}$, à tout moment un noeud i peut connaître le niveau de son énergie courante EC_i (appelée aussi énergie résiduelle). Par conséquent, le noeud i peut calculer le pourcentage de son énergie résiduelle ; $PER_i = EC_i/E_{initiale}$. Avant de prendre la décision d'être cluster head, membre actif ou passif, chaque noeud calcule un délai d'attente inversement proportionnel à son énergie résiduelle et son degré. Durant ce temps, le capteur écoute les messages transmis par les noeuds voisins ayant un temps d'attente inférieur au sien. Si ce temps expire sans que le noeud reçoive un message "head", en provenance d'un voisin dont le temps a expiré en premier, il décide d'être cluster head et transmet un message "head" (contenant son identifiant) aux voisins directs.

Dès qu'un noeud voisin reçoit un message "head", il change sa nature de décision, c.à.d. il décidera d'être un membre actif ou passif. En effet, lors de l'expiration du temps d'attente d'un noeud ayant reçu un message "head", sans que le noeud reçoive de messages "join", il décide d'être actif et envoie un message "join" (message d'activité) à ses voisins. Le message "join" est envoyé par un noeud membre du cluster à un saut. Dès qu'un noeud voisin reçoit un message "join", il déduit qu'il est membre à deux sauts d'un cluster et décide alors d'économiser son énergie en basculant directement vers l'état passif sans envoyer de message.

A la fin de cette phase, tous les noeuds décident de se mettre dans l'un des trois états : cluster head, membre actif ou membre passif d'un cluster. Les noeuds membres du cluster sont ordonnancés de manière à garantir la couverture totale de la zone d'intérêt.

Phase 3 : Phase d'activité

Dans cette phase, les noeuds qui décident d'être cluster head assurent la fonctionnalité du réseau (agrégation et envoi des données vers la station de base). Les noeuds qui décident d'être actifs assurent la surveillance de la zone de déploiement et l'envoi des données captées au cluster head.

A la fin de chaque période, les clusters heads envoient à leurs voisins $E_{seuilCH}$ qui est l'énergie moyenne consommée durant cette phase. Lors de la réception de ce seuil par des noeuds dont l'état est actif, chacun inclut (dans le message reçu) l'énergie moyenne consommée durant cette période d'activité $E_{seuilACT}$, et l'envoie au voisinage direct.

Dans notre protocole, la durée de vie du réseau est le temps séparant le déploiement des capteurs du moment où la zone n'est plus totalement couverte par les noeuds actifs (le protocole n'assure plus la couverture), ou un noeud n'est pas membre d'aucun cluster (le protocole ne respecte plus les conditions du clustering).

3.4.3.2 La fonction du temps d'attente

Le temps d'attente d'un capteur i est inversement proportionnel à son niveau d'énergie résiduelle et à son degré. Il est calculé par la formule ci-après :

$$T_{attente_i} = \frac{1}{(PEr_i^2 \times Deg_i)} + S_i$$

Le temps d'attente dépend du pourcentage d'énergie au carré, ceci afin de permettre aux noeuds ayant une plus grande quantité d'énergie, et un degré maximal de prendre une décision en premier. Dans le cas où le pourcentage d'énergie n'est pas assez élevé, les chances du capteur d'être cluster head diminuent. En effet, les noeuds ayant une quantité d'énergie résiduelle élevée et un degré maximal, auront un temps d'attente plus faible par rapport aux capteurs possédants une faible quantité d'énergie, et un degré maximal.

3.4.3.3 L'algorithme ECCoM

Dans une période d'activité donnée, le processus de décision d'un noeud i est décrit par l'algorithme ECCoM ci-dessous. Pour rentrer en décision d'être cluster head, l'énergie résiduelle d'un noeud doit être supérieure à un seuil prédéfini ($E_{seuilCH}$), ce seuil est l'énergie nécessaire pour assurer le rôle de cluster head durant une période entière, il est déterminé en considérant l'énergie moyenne consommée par un cluster head dans les périodes antérieures. En revanche, pour être un noeud actif, le pourcentage d'énergie résiduelle du capteur doit être supérieur au seuil d'activité ($E_{seuilACT}$), ce seuil est l'énergie nécessaire pour l'activité durant une période entière, il est déterminé en considérant l'énergie moyenne consommée par un capteur dans les périodes antérieures.

Initialement tous les capteurs possèdent la même quantité d'énergie initiale. À tout moment, un noeud i peut connaître le niveau de son énergie résiduelle $ERes_i$. Avant de prendre sa décision, chaque noeud calcule un délai d'attente qui est inversement proportionnel à son énergie résiduelle et son degré. Tant que le temps d'attente n'a pas encore expiré, le capteur écoute les messages envoyés par ses voisins. A l'expiration du temps d'attente si le capteur n'a reçu aucun message "head" ni message "join", il décide d'être un cluster head et envoie un message " head " à ses voisins.

Si un noeud reçoit uniquement un message "head" en provenance d'un noeud dont le temps d'attente a expiré en premier, sans la réception d'un message "join", il se met à l'état actif et envoie un message "join" a ses voisins afin d'annoncer son activité.

Si un noeud reçoit un message "join" d'un de ses voisins, il bascule directement en mode veille sans attendre l'expiration de son temps d'attente économisant ainsi son énergie.

Algorithme ECCoM

Début

Etat^p_i = ecoute ; // initialement tous les capteurs sont en état d'écoute

$$PEr_i = \frac{EC_i}{E_{initiale}}$$

Si (E_{r_i} ≥ E_{seuil_CH}) alors

//calcul du temps d'attente pour être cluster head ou membre actif

$$T_{attente_i} = \frac{1}{(PE_i)^2 * D_{gri}} + S_i ;$$

Sinon

Si (E_{r_i} ≥ E_{seuil_ACT}) alors

//calcul du temps d'attente pour être membre actif

$$T_{attente_i} = \frac{1}{(PE_i)^2 * D_{gri}} + S_i ;$$

Sinon

// Le capteur ne peut devenir ni CH ni membre actif (il est considéré défaillant).

Etat^p_i =deffaillant ;

Envoyer (msg_defaillant) ;

Finsi ;

Fin si ;

Si (T_{attente_i} = 0) alors

Si (non reception (msg_head, j) et (non reception (msg_join))) alors

Etat^p_i =CH ;

Envoyer (msg_head, i);

Sinon

Si (reception (msg_head, j) alors

Etat^p_i =actif ;

Envoyer (msg_join, idCH);

Finsi ;

Finsi ;

sinon

Si reception (msg_join, idCH)) alors

Etat^p_i =passif ;

Finsi ;

Finsi ;

Fin.

A la fin de chaque période d'activité les noeuds exécutent l'algorithme décrit ci-dessous. Les noeuds dont l'état est cluster head ou actif envoient leurs seuils aux voisins. En effet, chaque

noeud dont l'état est cluster head envoie son $E_{seuilCH}$ qui représente la moyenne de l'énergie consommée par ce dernier durant la période d'activité. A la réception de ce seuil, si l'état d'un noeud est actif, il inclut (dans le message reçu) son seuil d'activité $E_{seuilACT}$ qui représente la moyenne de l'énergie consommée par ce noeud durant la période courante.

Algorithme d'échange des seuils

Debut

Si (Etat_{p_i} = CH) alors

Envoyer (i, msg_seuil_CH, E_{seuil_CH});

Sinon

Si (Etat_{p_i} = actif) et reception (j, msg_seuil_CH, E_{seuil_CH}) alors

Envoyer (i, msg_seuil_ACT, E_{seuil_CH}, E_{seuil_ACT});

Finsi ;

Finsi ;

Fin.

3.5 Exemple d'application du protocole de clustering

Pour illustrer le fonctionnement du protocole proposé, nous supposons vingt capteurs déployés aléatoirement pour couvrir totalement une zone d'intérêt (figure 3.2).

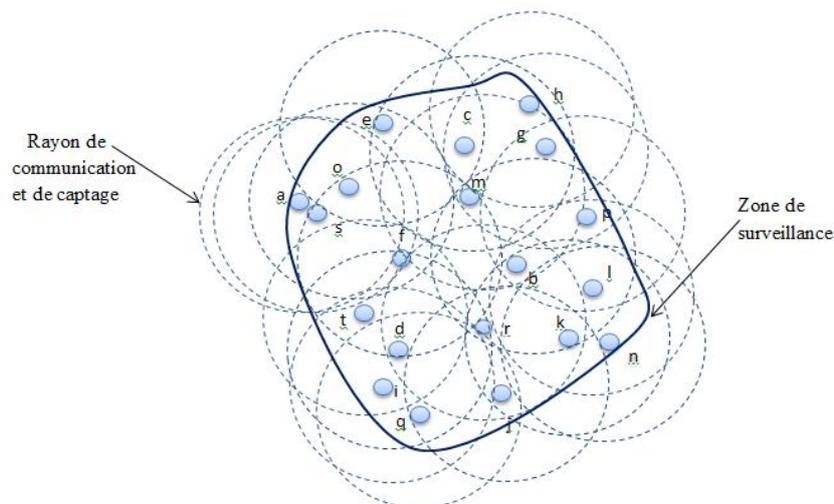


FIGURE 3.2: exemple d'application du protocole ECCoM

Initialement tous les capteurs possèdent la même quantité d'énergie. Il est à noter que les rayons de communication et de couverture d'un capteur sont égaux.

Phase 1 : découverte de voisins

C'est la phase qui permet aux noeuds de connaître leurs voisinages à un saut, elle est exécutée par tous les capteurs lors de l'initialisation du réseau. Autrement dit, elle n'est exécutée qu'une seule fois après le déploiement des capteurs vu que les noeuds sont statiques. Le voisinage change si un capteur est défaillant. A l'issue de cette phase, tout noeud possède son degré. Le tableau suivant illustre les degrés des capteurs.

Dans le présent exemple, nous supposons que l'émission d'un message " hello " coute 0.2 unité d'énergie et sa réception coute 0.1 unité d'énergie.

Le résultat de la phase de découverte des voisins

Noeud	Degré	ECon	ID Voisins 1 saut
a	2	0.08	s,o
b	5	0.17	m,p,l,k,r
c	4	0.13	e,g,m,h
d	5	0.18	f,t,i,q,r
e	2	0.09	c,o
f	5	0.10	o,s,m,t,d
g	4	0.14	h,c,m,p
h	2	0.09	c,g
i	3	0.12	t,d,q
j	3	0.13	q,r,k
k	5	0.19	j,r,b,l,n
l	4	0.16	n,k,b,p
m	4	0.19	f,c,g,b
n	2	0.10	l,k
o	4	0.13	f,s,a,e
p	3	0.14	b,g,l
q	3	0.12	i,d,j
r	4	0.19	b,k,j,d
s	3	0.12	a,o,f
t	3	0.14	f,d,i

TABLE 3.1: exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la phase de découverte

Nous supposons également que l'émission d'un message coûte 1 unité d'énergie et sa réception 0.5 unité d'énergie. La consommation d'énergie d'un cluster head, quant à elle, est à 5 unités d'énergie.

Première période d'activité

Dans cette phase, chaque capteur calcule un temps d'attente inversement proportionnel à son pourcentage d'énergie et son degré, c.à.d. que le noeud ayant une grande quantité d'énergie attend une faible durée pour prendre une décision (cluster head ou membre actif ou passif). L'exécution du protocole de clustering par chaque capteur, permet l'obtention des résultats illustrés dans le tableau 3.2 ci-après.

noeud	degré	PER_i	MEC	Seuil-CH	Seuil-ACT	$S_i \in [0, 0.01]$	$T_{attente}$	Etat	Ordre de décision
A	2	97	0	0	0	0,01	0,5414	passif	20
B	5	94	0	0	0	0,009	0,2353	Actif	4
C	4	95	0	0	0	0,006	0,2830	actif	8
d	5	94	0	0	0	0,002	0,2283	Actif	2
e	4	97	0	0	0	0,006	0,2717	CH	5
f	5	94	0	0	0	0,001	0,2273	CH	1
g	4	95	0	0	0	0,01	0,2870	passif	11
h	2	97	0	0	0	0	0,5314	passif	18
i	3	96	0	0	0	0,001	0,3743	passif	17
j	3	96	0	0	0	0,003	0,3646	Actif	13
k	5	94	0	0	0	0,005	0,2313	CH	3
l	4	95	0	0	0	0,007	0,284	passif	9
m	4	95	0	0	0	0,004	0,281	Passif	6
n	2	97	0	0	0	0,006	0,537406	Actif	19
o	4	95	0	0	0	0,005	0,282	Actif	7
p	3	96	0	0	0	0,002	0,36369	Passif	12
q	3	96	0	0	0	0,004	0,3657	Passif	14
r	4	95	0	0	0	0,009	0,286	Passif	10
s	3	96	0	0	0	0,006	0,3677	Passif	15
t	3	96	0	0	0	0,007	0,3687	Passif	16

TABLE 3.2: Exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la première période d'activité.

En effet, le temps d'attente du capteur "f" expire en premier, il décide donc d'être un cluster head et envoie un message "head" contenant son identifiant à ses voisins à un saut (capteurs s, o,

m, d et t). Lors de la réception de ce message, les voisins dont le temps d'attente n'a pas encore expiré restent en écoute des messages d'activité.

Lorsque le temps d'attente du noeud "d" expire, sans qu'il reçoive un message d'activité, il décide de se mettre à l'état actif et envoie un message "join" (d'activité) à ses voisins (f, t, i, q et r). Les noeuds (i, q, r et t) dont le temps d'attente n'a pas encore expiré, reçoivent ce message, ils passent donc à l'état passif sans attendre l'expiration de leurs temps d'attente.

Après l'expiration de son temps d'attente, et sans avoir reçu de messages "head", le capteur "k" décide d'être un cluster head et envoie un message "head", en incluant son identifiant (ses voisins sont j, r, b, l et n).

Le temps d'attente du noeud "b" expire sans qu'il reçoive un message d'activité, alors il devient actif et envoie un message "join" (d'activité) au voisinage (p, m, l et r). Les noeuds voisins mettent leurs états à passif suite à la réception de ce message d'activité.

Le noeud "e" décide d'être cluster head suite à l'expiration de son temps d'attente, il envoie alors un message "head" aux voisins (o, c). Le temps d'attente du noeud "c" a expiré sans recevoir un message "join" (d'activité), il se met donc à l'état actif et envoie un message d'activité aux voisins (h, g, e et m). À la réception de ce message, les noeuds h et g basculent immédiatement vers l'état passif sans attendre l'expiration de leurs temps d'attente.

Le temps d'attente du noeud "o" expire sans recevoir un message d'activité, il devient actif et envoie un message d'activité aux voisins (a, s, f et e), le noeud s reçoit le message d'activité du noeud o, après la réception d'un msg-head du noeud f, donc il se met à l'état passif. Le noeud a reçoit le message d'activité du noeud o dont le temps d'attente n'a pas encore expiré, le noeud a bascule à l'état passif, car il est voisin à deux sauts d'un noeud actif.

Le temps d'attente du noeud "j" expire sans qu'il reçoive un message d'activité alors qu'il a déjà reçu un message msg-head. Il devient donc actif et envoie un message d'activité qui sera reçu par (q et k), le noeud k est un cluster head donc il ignore ce message, tandis que noeud q bascule à l'état passif.

Le temps d'attente du noeud "n" expire sans recevoir un message d'activité après la réception d'un message msg head du noeud k, alors il décide d'être actif.

A la fin de chaque période d'activité, les clusters head envoient leur énergie moyenne consommée durant cette phase. Les noeuds actifs envoient également la moyenne de leur énergie consommée aux voisins afin de décider de leurs participations à la prochaine période.

La figure 3.3 illustre le résultat de l'algorithme ECCoM pour la période 1.

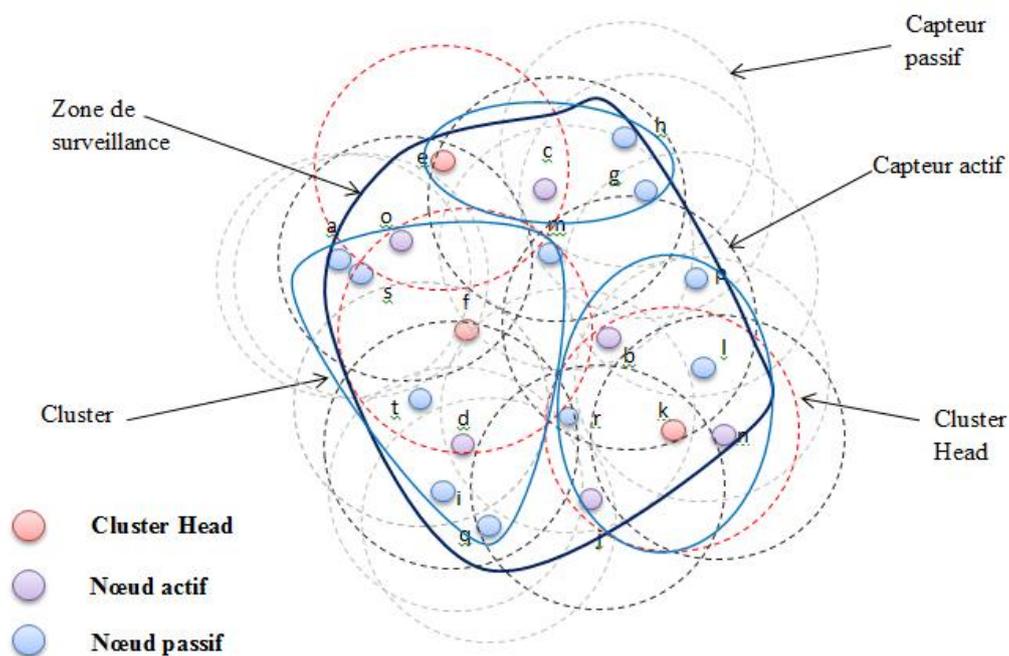


FIGURE 3.3: exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 1.

À la fin de chaque période d'activité les noeuds capteurs dont l'état cluster head ou actif, calculent l'énergie moyenne consommée lors de cette période.

Deuxième période d'activité

le tableau 3.3 illustre les $E_{seuil-CH}$, $E_{seuil-ACT}$ et MEC lors de cette première période.

Capteur	MEC	$E_{seuil-CH}$	$E_{seuil-ACT}$
A	0	0,225	0,15
B	0,1	0,25	0,1
C	0,1	0,2	0,1
D	0,1	0,225	0,1
E	0,2	0,2	0,125
F	0,225	0,225	0,15
G	0	0,2	0,1
H	0	0,2	0,1
I	0	0,225	0,1
J	0,1	0,25	0,1
K	0,25	0,25	0,15
L	0	0,25	0,1
M	0	0,75	0,1
N	0,1	0,25	0,1
O	0,15	0,2125	0,15
P	0	0,25	0,1
Q	0	0,2375	0,1
R	0	0,2375	0,1
S	0	0,2625	0,15
T	0	0,225	0,1

TABLE 3.3: les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 1.

Au début de chaque période d'activité chaque capteur compare son pourcentage d'énergie PE_i avec les seuils $E_{seuil-CH}$ et $E_{seuil-ACT}$ envoyés par ses voisins afin de prendre une décision.

L'application de l'algorithme proposé permet aux capteurs de prendre les décisions suivantes :

Noeud	Degré	PEr_i	$S_i \in [0, 0.01]$	$T_{attente}$	Etat	Ordre de décision
<i>a</i>	2	97	0,01	0,5414	Actif	14
<i>b</i>	5	74	0	0,3652	Passif	8
<i>c</i>	4	75	0,005	0,4494	Passif	12
<i>d</i>	5	74	0,01	0,3752	Passif	11
<i>e</i>	4	57	0,007	0,7764	CH	17
<i>f</i>	5	49	0,008	0,8409	Passif	18
<i>g</i>	4	95	0,006	0,28300	CH	1
<i>h</i>	2	97	0,007	0,53840	Actif	13
<i>i</i>	3	96	0,01	0,3717	Actif	10
<i>j</i>	3	76	0,006	0,5831	Actif	15
<i>k</i>	5	44	0,007	1,0400	Passif	20
<i>l</i>	4	94	0,009	0,29193	CH	4
<i>m</i>	4	95	0,008	0,28500	Actif	2
<i>n</i>	2	77	0,005	0,848312	Actif	19
<i>o</i>	4	65	0,01	0,601716	Passif	16
<i>p</i>	3	96	0	0,3617	Actif	5
<i>q</i>	3	96	0,001	0,3627	CH	6
<i>r</i>	4	95	0,009	0,28600	CH	3
<i>s</i>	3	96	0,004	0,36569	CH	9
<i>t</i>	3	96	0,002	0,36369	CH	7

TABLE 3.4: exemple d'application du protocole ECCoM : deuxième période d'activité.

La figure 3.4 illustre le résultat de l'algorithme ECCoM pour la période 2.

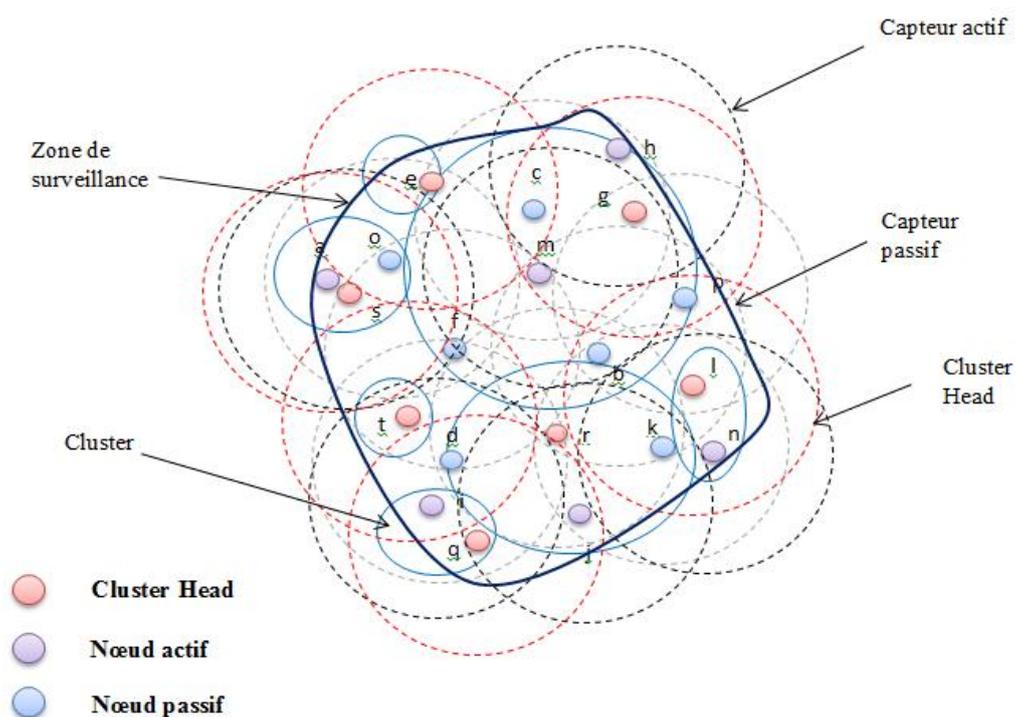


FIGURE 3.4: exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 2.

Troisième période d'activité

Soient les valeurs de l'énergie Moyenne consommée durant la période 2 :

Capteur	MEC	$E_{seuil-CH}$	$E_{seuil-ACT}$
A	0,1	0,1	0,1
B	0,1	0,1	0,1
C	0,1	0,325	0,1
D	0,1	0,1	0,15
E	0,275	0,275	0,275
F	0,225	0,325	0,1
G	0,325	0,325	0,1
H	0,1	0,325	0,1
I	0,15	0,275	0,15
J	0,25	0,1	0,25
K	0,275	0,325	0,2
L	0,2	0,325	0,2
M	0,1	0,325	0,1
N	0,2	0,2	0,2
O	0,15	0,1	0,1
P	0,15	0,325	0,15
Q	0,275	0,41	0,2
R	0,1	0,75	0,25
S	0,1	0,76	0,1
T	0,1	0,76	0,15

TABLE 3.5: les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 2.

L'application de l'algorithme ECCoM permet aux capteurs de prendre les décisions décrites dans le tableau 3.6.

Noeud	Degré	PER_i	$S_i \in [0, 0.01]$	$T_{attente}$	Etat	Ordre de décision
<i>a</i>	2	77	0,01	0,8533	passif	13
<i>b</i>	5	74	0,002	0,3672	CH	1
<i>c</i>	4	75	0,004	0,4484	CH	3
<i>d</i>	5	74	0,003	0,36823	CH	2
<i>e</i>	4	27	0,009	3,4383	passif	20
<i>f</i>	5	49	0,008	0,84098	passif	11
<i>g</i>	4	3	0,006	2,7837	passif	19
<i>h</i>	2	77	0,007	0,85031	actif	12
<i>i</i>	3	66	0,01	0,7752	passif	10
<i>j</i>	3	46	0	1,5752	passif	16
<i>k</i>	5	44	0,004	1,03706	passif	14
<i>l</i>	4	39	0,002	1,64565	actif	17
<i>m</i>	4	75	0,005	0,4494	actif	4
<i>n</i>	2	57	0,007	1,5459	CH	15
<i>o</i>	4	65	0,008	0,5997	actif	8
<i>p</i>	3	66	0,002	0,7672	actif	19
<i>q</i>	3	41	0,001	1,9839	actif	18
<i>r</i>	4	75	0,008	0,4524	actif	5
<i>s</i>	3	76	0,007	0,5841	CH	7
<i>t</i>	3	76	0	0,5771	actif	6

TABLE 3.6: exemple d'application du protocole ECCoM : troisième période d'activité.

La figure 3.5 illustre le résultat de l'algorithme ECCoM pour la période 3.

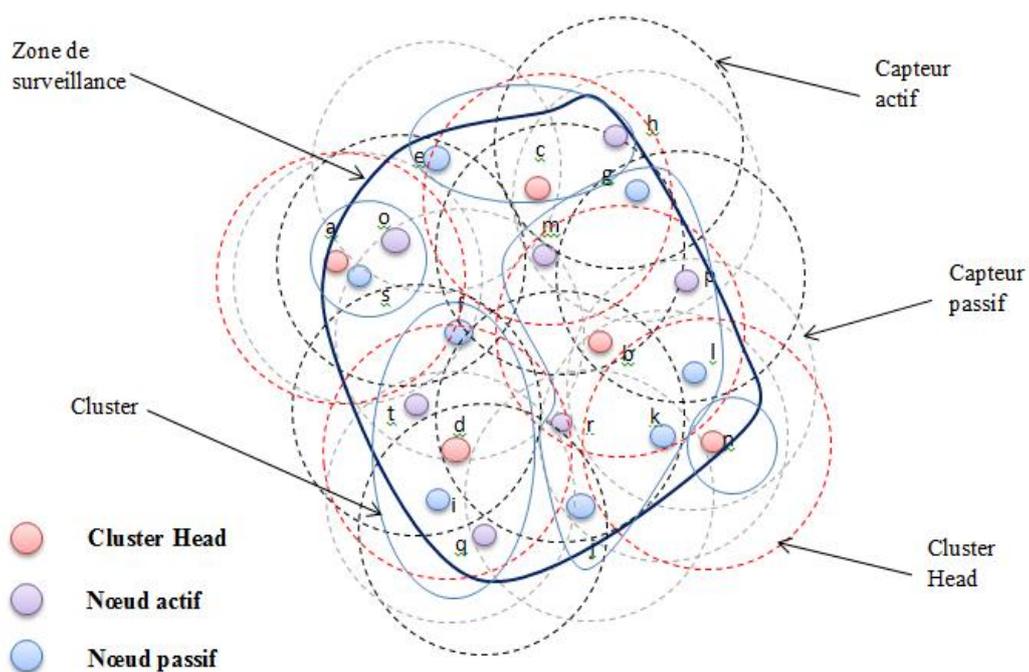


FIGURE 3.5: exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 3.

Quatrième période d'activité

Soient les valeurs de l'énergie Moyenne consommée durant la période 3 :

Capteur	MEC	$E_{seuil-CH}$	$E_{seuil-ACT}$
A	0,2	0,325	0,25
B	0,425	0,425	0,25
C	0,375	0,375	0,2
D	0,425	0,425	0,3
E	0,375	0,375	0,25
F	0,225	0,425	0,2375
G	0,325	0,375	0,225
H	0,2	0,375	0,2
I	0,15	0,425	0,2875
J	0,25	0,425	0,3125
K	0,25	0,425	0,275
L	0,2	0,425	0,25
M	0,25	0,425	0,25
N	0,375	0,375	0,375
O	0,25	0,325	0,25
P	0,25	0,425	0,3
Q	0,375	0,425	0,375
R	0,25	0,425	0,25
S	0,325	0,325	0,25
T	0,2	0,425	0,2

TABLE 3.7: les valeurs de l'énergie moyenne consommée durant la période 3.

En appliquant l'algorithme ECCoM, on obtient les décisions des capteurs illustrées dans le tableau 3.8.

Noeud	Degré	PER_i	$S_i \in [0, 0.01]$	$T_{attente}$	Etat	Ordre de décision
<i>a</i>	2	57	0,002		défaillant	
<i>b</i>	5	9	0,004		défaillant	
<i>c</i>	4	20	0,006	6,256	passif	14
<i>d</i>	5	9	0,005		défaillant	
<i>e</i>	4	7	0,008		défaillant	
<i>f</i>	5	49	0,001	0,834	CH	2
<i>g</i>	4	30	0,003	2,7807	passif	12
<i>h</i>	2	57	0,005	1,5493	CH	8
<i>i</i>	3	66	0,009	0,77423	CH	1
<i>j</i>	3	46	0,007	1,5823	Passif	10
<i>k</i>	5	44	0	1,0333	CH	3
<i>l</i>	4	39	0,01	1,65365	actif	11
<i>m</i>	4	45	0,001	1,2355	actif	5
<i>n</i>	2	22	0,004	10,3345	passif	15
<i>o</i>	4	45	0,003	1,2375	actif	6
<i>p</i>	3	46	0,002	1,5773	CH	9
<i>q</i>	3	21	0,008		défaillant	
<i>r</i>	4	45	0,005	1,2395	Actif	7
<i>s</i>	3	31	0,009	3,4779	passif	13
<i>t</i>	3	56	0,01	1,0729	Actif	4

TABLE 3.8: exemple d'application du protocole ECCoM : résultats de la période 4

La figure 3.6 illustre le résultat de l'algorithme ECCoM pour la période 4.

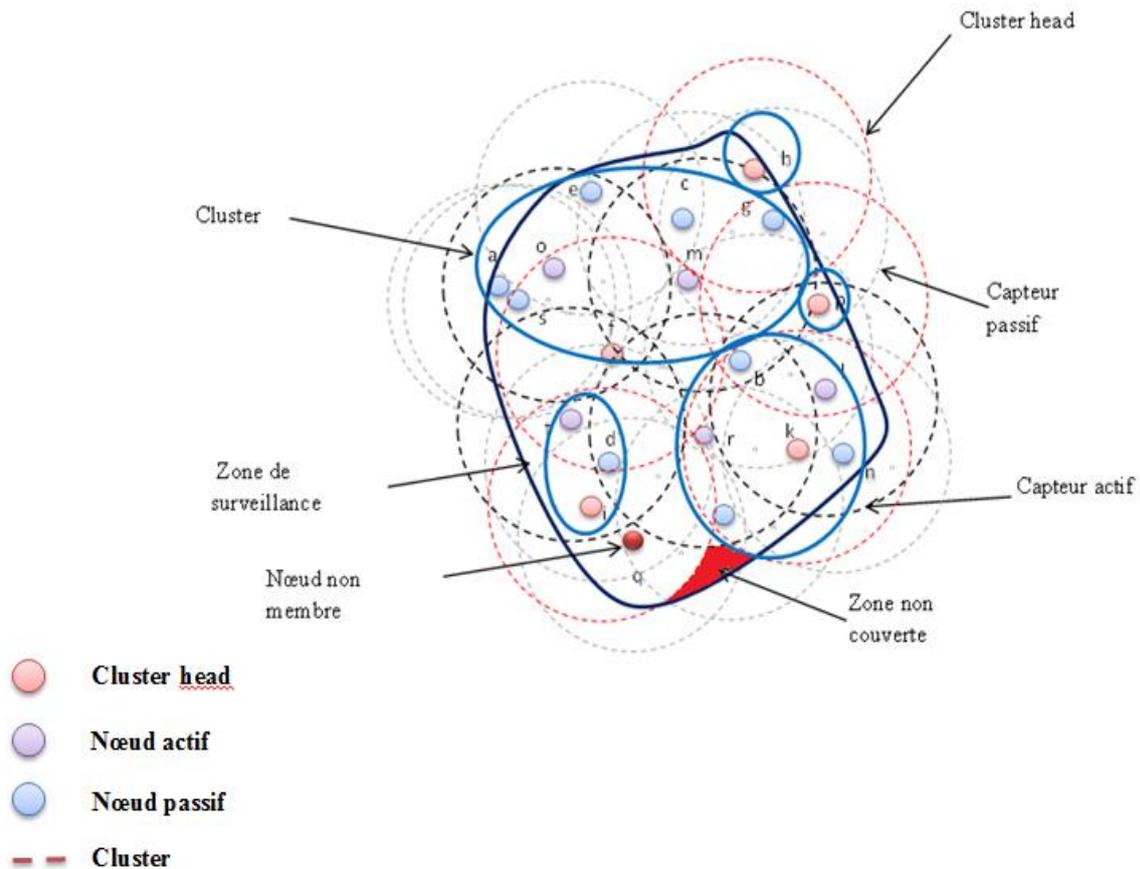


FIGURE 3.6: exemple d'application du protocole ECCoM : état des capteurs à la période 4.

Dans cette période, le protocole s'arrête car le capteur q est défaillant, il n'a pas assez d'énergie pour devenir cluster head, et il n'est couvert par aucun de ses voisins, donc la zone de déploiement n'est pas totalement couverte par les noeuds restants.

En effet la solution proposée traite le problème de couverture en utilisant la clustering. Le noeud "q" n'est pas membre d'aucun cluster, donc il ne respecte pas le principe des algorithmes de clustering, et il ne peut pas être couvert par aucun de ses voisins. Donc la zone de déploiement n'est pas totalement couverte par les noeuds restants.

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre ECCoM, un protocole de clustering permettant le maintien de la couverture dans les réseaux de capteurs homogènes. La solution proposée se base sur le calcul d'un temps d'attente ayant un double objectif, il permet d'une part l'élection des clusters head, et d'autre part l'ordonnancement d'activité des membres des clusters. Le protocole ECCoM à deux caractéristiques principales, il ne requiert pas la connaissance des positions géographiques des capteurs, ce qui permet d'utiliser des capteurs simples ne comportant aucun dispositif complexe. De plus, à chaque période du processus d'ordonnancement, l'activité des capteurs est en fonction de leur quantité d'énergie résiduelle, ce qui permet l'équilibrage de charge entre les capteurs du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous procédons à la validation du protocole ECCoM, et ce à travers la simulation. Cette dernière permet de calculer certains paramètres de performance, tels que le taux de couverture, la consommation énergétique et le nombre de clusters.

Simulation et évaluation des performances.

Sommaire

4.1 Introduction	80
4.2 Techniques d'évaluation de performances	80
4.3 Simulation et évaluation des performances du protocole proposé	81
4.4 Comparaison des performances	89
4.5 Conclusion	97

4.1 Introduction

Le développement des applications informatiques complexes nécessitent d'assurer le bon fonctionnement de ces dernières, et ce en évaluant les performances des nouveaux systèmes ou d'analyser les systèmes existants. La simulation est l'une des techniques les plus répandues pour l'évaluation des performances d'un protocole donné [51].

Ce chapitre est consacré au modèle de simulation et l'analyse des performances du protocole proposé ECCoM. Pour ce faire, ses résultats vont être comparés avec ceux du protocole DEECIC (pour Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage) [42], une solution qui préserve la couverture basé sur la technique du clustering et ce afin de montre les gains substantiels du protocole proposé.

4.2 Techniques d'évaluation de performances

Il existe trois techniques d'évaluations des performances des systèmes : la modélisation analytique, la simulation et les mesures obtenues à partir d'un système réel. Nous pouvons classifier ces techniques en deux grandes catégories : les techniques basées sur la mesure et les techniques basées sur la modélisation (méthodes analytiques et simulation) [51] tel qu'il est montré dans la figure suivante :

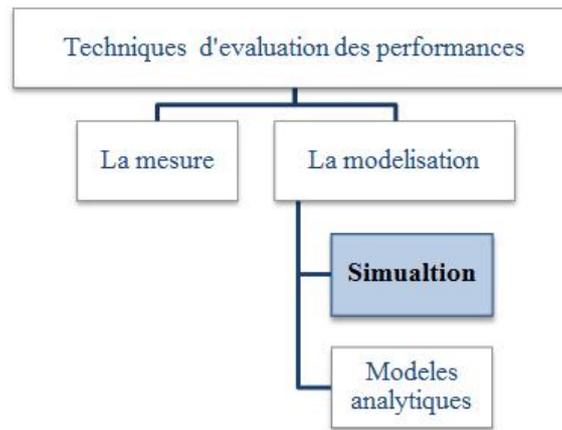


FIGURE 4.1: Les techniques d'évaluation de performances.

La mesure joue un rôle croissant dans l'évaluation des réseaux de télécommunication. La mesure est très importante car elle vise à dégager les lois qui gouvernent éventuellement l'Internet, identifier et modéliser le trafic réel, faciliter la configuration et l'administration des réseaux [51].

La modélisation consiste à représenter les conditions réelles de façons formelles à l'aide d'outils mathématiques.

La simulation consiste à modéliser la globalité du système étudié à le simuler numériquement à l'aide d'évènements provenant de mesures sur un système réel. L'intérêt de la simulation est de pouvoir travailler sur des systèmes non disponibles. Par exemple, lors de l'étape de la conception, il est beaucoup moins coûteux de réaliser une simulation préalable des alternatives envisagées. De plus la simulation est un moyen très souple d'étudier un problème.

Cette technique permet des réexécution de programmes avec changement de paramètres et une prise de trace d'exécution sans perturbations. Enfin elle permet puisque le temps est modélisé d'arrêter la simulation pour revenir à un état antérieur.

4.3 Simulation et évaluation des performances du protocole proposé

Nous constatons que les conditions d'expérimentation sont aujourd'hui toujours plus difficiles et plus coûteuses ; nous avons recours donc de plus en plus à l'expérimentation indirecte, notamment aux techniques de simulation. En effet, nous avons opté pour utiliser la simulation afin d'évaluer les performances du protocole ECCoM, comme outil de simulation, nous avons décidé de concevoir notre propre simulateur écrit en JAVA. Cette décision a été prise après l'étude

de quelques simulateurs de réseaux de capteurs existants (NS-2 [52], etc) et le temps nécessaire pour la prise en main de ces simulateurs, était bien supérieur à la création d'un simulateur adapté à nos besoins.

4.3.1 Modèle de simulation

Afin d'évaluer les performances du protocole proposée, nous avons utilisé un simulateur à événements discrets qui modélise un système réel, tel qu'il évolue dans le temps, par une représentation dans laquelle les variables ne changent qu'en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps. Ces points sont les instants où se passent les événements [53].

4.3.1.1 Description du système

Notre système représente une zone de déploiement d'une surface de $100 \times 100 \text{ m}^2$ comportant un nombre variable de capteurs de 100 à 200. De ce fait, les entités de notre système sont :

Les capteurs : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs sans fil statiques, aléatoirement dispersés sur la zone simulé, et présentant des caractéristiques identiques en termes de puissance de traitement, capacité de stockage, et énergie initiale.

Les messages Hello : lors de l'initialisation du réseau, chaque capteur signale son existence à ses voisins.

Les messages Head : lors d'une période d'activité, les capteurs qui décident d'être cluster head envoient un message pour annoncer cette décision. Ce message contient l'identifiant du cluster head.

Les messages d'activité : durant une période d'activité, les capteurs qui décident d'être actifs envoient un message pour annoncer leur activité.

4.3.1.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio utilisé pour calculer l'énergie consommée en émission et en réception des messages, est celui proposé par Heinzelman et al [53] (figure 4.1).

L'énergie consommée lors de la transmission est donnée par :

$$E_e = E_{elec} * pk + E_{amp} * pk * d^2$$

Par contre l'énergie consommée à la réception, est donnée par :

$$E_e = E_{elec} * pk$$

Où :

- E_{elec} : l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique), elle est fixée à 100 pJ/bit.
- E_{amp} : l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur), elle est fixée à 50 nJ/bit.
- Pk : la taille en bits d'un paquet de données.
- d : la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

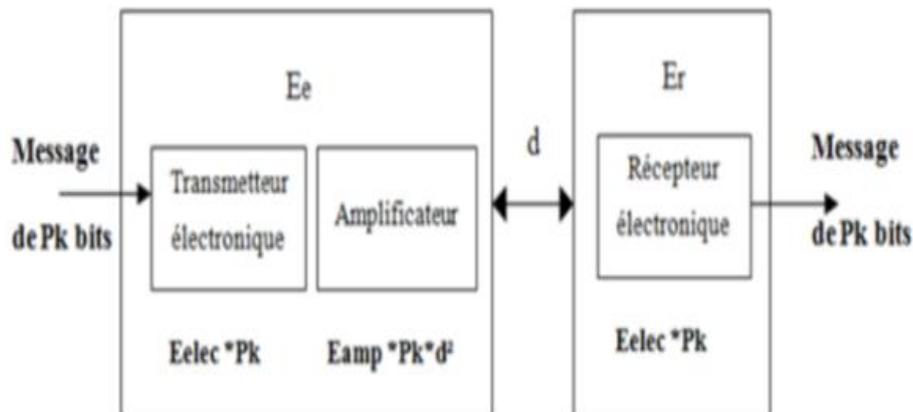


FIGURE 4.2: Le modèle d'énergie utilisé dans la simulation.

Les sources d'énergie des noeuds ont été initialisées à 2 joules. La taille d'un message envoyé leur de la décision d'un capteur (comportant ses coordonnées et son rayon de capture), est fixée à 32 bits.

4.3.1.3 Variables descriptives du système

Les différentes variables utilisées dans notre système sont illustrées dans le tableau suivant :

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Unité de mesure
Energie consommée lors de l'émission d'un message Hello	Re-hello	Réel	Joule
Energie consommée lors de l'émission d'un message Head	Re-head	Réel	Joule
Energie consommée lors de l'émission d'un message d'activité	Re	Réel	Joule
Energie consommée lors de la réception d'un message Hello	Rc-hello	Réel	Joule
Energie consommée lors de la réception d'un message Head	Rc-head	Réel	Joule
Energie consommée lors de la réception d'un message d'activité	Rc	Réel	Joule
Energie résiduelle (ou courante) d'un capteur	Rc	Réel	Joule
Nombre de noeuds actifs	NbrAct	Entier	-
Etat du capteur	Etat	Entier	-
Nombre des Itérations	NbrPeriodes	Entier	-

TABLE 4.1: Les variables descriptives du système.

4.3.1.4 Evènements discrets du système

L'ensemble des évènements qui peuvent survenir dans le temps, et qui provoquent un changement d'état des variables descriptives de notre modèle de simulation, sont représentés dans le tableau suivant :

Evènement	Description
Découverts des voisins	Cet évènement se fait lors de l'initialisation du réseau, il permet de calculer le degré (le nombre de voisins) de chaque capteur
Début d'une période d'activité	Cet événement déclenche l'exécution du protocole ECCoM
Mise à jour du délai d'attente	Cet événement se produit à chaque début de la phase de décision
Envoi d'un message " head "	Cet événement se produit lorsqu'un noeud décide d'être un cluster head à la fin de son attente
Réception d'un message " head "	Cet événement se produit lorsqu'un voisin a décidé d'être un cluster head
Envoi d'un message " join "	Cet événement se produit lorsqu'un noeud reçoit un message " head " en premier puis il décide d'être actif à la fin de son attente
Réception d'un message " join "	Cet événement se produit lorsqu'un voisin a décidé d'être actif
Envoi d'un message de défaillance	Cet événement se produit lorsqu'un voisin ne possède pas l'énergie nécessaire pour participer à une période
Réception d'un message de défaillance	Cet événement se produit lorsqu'un voisin a décidé d'être défaillant
La mise à jour du pourcentage d'énergie consommé d'un capteur	Cet événement se produit à chaque fin d'une période d'activité
La mise à jour du degré d'un capteur	Cet événement se produit à chaque réception d'un message de défaillance

TABLE 4.2: Evènements discrets du système.

4.3.1.5 Choix du langage de programmation

Afin de valider expérimentalement l'algorithme de couverture proposé, nous avons choisi de concevoir notre propre simulateur en utilisant la version d'IDE Helios 3.6.2 [54] qui est un projet open source fondé par Sun Microsystems.

Eclipse est un environnement de développement permettant d'écrire, compiler, déboguer et déployer des programmes. Il est écrit en Java mais peut supporter n'importe quel langage de

programmation. Java s'annonce comme l'une des évolutions majeures de la programmation, il satisfait aux besoins de l'immense majorité des développeurs. L'un des avantages évidents de ce langage est une bibliothèque d'exécution indépendante de la plateforme : il est possible d'utiliser le même code pour Windows, UNIX, Macintosh, etc. Les caractéristiques fondamentales de Java sont : distribution, fiabilité, orienté objet, architecture neutre, portable, interprété, performances élevées et multithread.

4.3.1.6 Etapes de réalisation du simulateur

Les étapes décrivant la réalisation de notre simulateur sont illustrées par la figure ci-dessus :

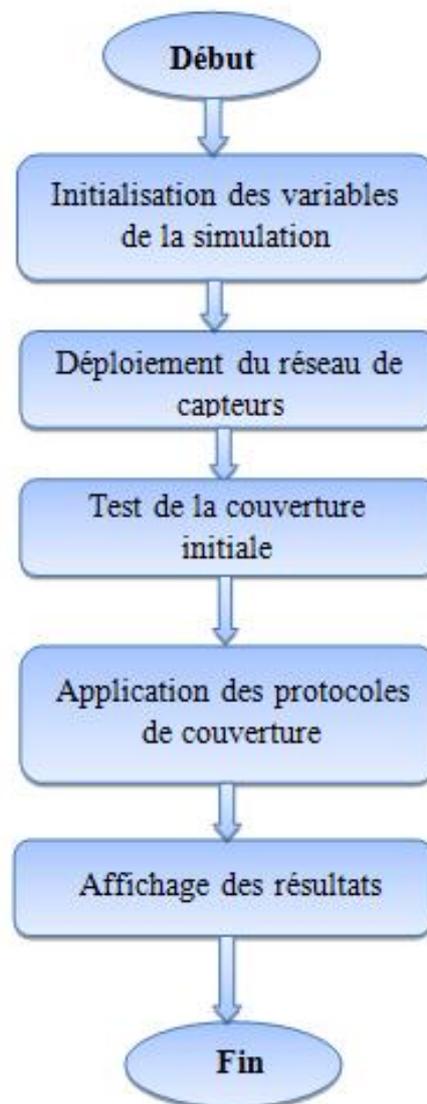


FIGURE 4.3: Etapes de réalisation du simulateur.

Initialisation des variables

Cette phase est exécutée automatiquement au début du programme de simulation. Elle inclut la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, zone de déploiement simulée, ...) et leur initialisation ainsi que la création des capteurs (coordonnées, rayon de communication, rayon de capture, énergie initiale) et leur dissémination aléatoire sur la zone du déploiement.

Déploiement du réseau de capteurs

Les capteurs constituant notre réseaux sont déployés d'une manière aléatoire sur une surface de $(100 \times 100) m^2$. Chaque capteur dans le réseau est représenté par son identifiant.

Test de la couverture initiale

Une topologie créée n'est conservée à la simulation que si elle couvre totalement la zone de déploiement. Au début du programme de simulation et après le déploiement des capteurs, on vérifie si l'ensemble des capteurs qui forment le réseau est couvrant. Si oui, on exécute l'algorithme de couverture, dans le cas contraire on refait le déploiement.

Application des algorithmes de couverture

On applique les deux algorithmes de couverture (ECCoM et DEECIC) sur toute topologie couvrante. Durant une période d'activité donnée l'énergie des clusters head et celle des noeuds actifs diminuent d'une certaine quantité, et à chaque nouvelle période seuls les noeuds qui ont une quantité d'énergie supérieur à un seuil rentrent en décision, les autres sont défaillants. Par conséquent, la topologie du réseau change et on recalcule le taux de couverture produit par les noeuds restants. Donc les algorithmes sont réitérés jusqu'à ce que la topologie restante ne couvre pas totalement la zone de déploiement.

Affichage des résultats

Les résultats de la phase précédente seront utilisés pour tracer des courbes. Ces courbes serviront à comparer les protocoles de couverture implémentés selon les métriques de performances choisis (nombre de noeuds actifs, taux de couverture, énergie consommée, etc.).

4.3.2 Les paramètres de simulation

Pour expérimenter le protocole proposé, nous avons utilisé les paramètres suivants : les résultats obtenus sont la moyenne de 100 itérations simulées. Dans un premier temps nous examinerons le comportement du protocole en fonction du nombre de périodes pour 100 et 200

noeuds déployés sur une zone carrée de dimension $100 \times 100 \text{ m}^2$, dans un deuxième temps nous évaluerons les performances du protocole en fonction de nombre de noeuds défaillants.

Le déploiement des noeuds est uniforme et aléatoire. Après déploiement, seules les topologies couvrantes (c.à.d. l'ensemble des capteurs déployés couvrent totalement la zone d'intérêt) sont concernées pour la simulation.

Pour l'évaluation de la couverture, la zone de déploiement est divisée en cellules de $10 \times 10 \text{ m}^2$. Une cellule est considérée couverte si son centre est couvert (Figure 4.3). Le pourcentage de zone couverte est alors le rapport entre le nombre de cellules couvertes par au moins un capteur et le nombre total de cellules.

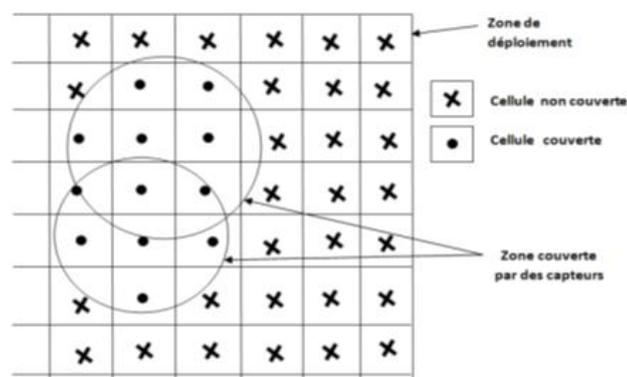


FIGURE 4.4: Méthode d'évaluation de la couverture.

4.3.3 Les paramètres de performances

Les critères de performances retenus lors de l'évaluation du protocole ECCoM sont : (1) le taux de couverture fourni par les noeuds actifs, (2) le pourcentage des noeuds actifs, (3) le pourcentage d'énergie consommée.

4.3.3.1 Le taux de couverture

C'est le pourcentage moyen de la zone de déploiement couverte par l'ensemble des noeuds actifs.

4.3.3.2 Le pourcentage des noeuds actifs

C'est le rapport entre le nombre moyen de membre actifs d'un cluster durant une période et le nombre total de noeuds déployés.

4.3.3.3 Energie totale consommée

Représente le pourcentage d'énergie totale consommée par chaque noeud durant une période d'activité.

4.4 Comparaison des performances

Nous comparons les résultats obtenus par ECCoM avec ceux du protocole hiérarchique DEECIC (pour Distributed Energy-Efficient Clustering with Improved Coverage), proposé par Z. Liu et al [42]. Ce dernier permet de construire des clusters en se basant sur le degré des noeuds. Le choix de comparaison avec DEECIC a été motivé par ses résultats qui rivalisent parfaitement avec ceux des deux meilleures solutions proposées dans la littérature [43, 44]. La comparaison est faite dans un réseau homogène où les capteurs possèdent un rayon de communication fixé à 20 mètres et un rayon de captage fixé à 10 mètres.

4.4.1 Variation du nombre de périodes

Dans ce qui suit, nous évaluons les résultats fournis par ECCoM et ce en variant le nombre de périodes entre 5 et 40 pour un déploiement de 100 noeuds, et entre 10 et 55 périodes pour un déploiement de 200 noeuds.

4.4.1.1 Taux de couverture

Le taux de couverture moyen est défini comme étant le pourcentage de la zone d'intérêt couverte par l'ensemble de noeuds actifs. Il est mesuré à la fin de chaque période d'activité, puis à la fin d'exécution de l'algorithme, on calcule la moyenne des taux de toutes les périodes. Pour cela, nous utilisons la méthode de discrétisation de la zone d'intérêt décrite précédemment (section 4.3.2).

La figure 4.5 représente la variation du taux moyen de couverture fourni par les deux protocoles DEECIC et ECCoM, pour 100 noeuds déployés, en fonction du nombre de périodes.

A partir de la figure 4.5, on remarque que DEECIC fournit un taux de couverture meilleure que ECCoM, il est de 100 % contre 99,46 % pour le nombre de périodes le plus faible. En effet, cette différence se justifie par le fait que le protocole ECCoM met à l'état passif les capteurs redondants (ce qui réduit légèrement le taux de couverture) alors que dans le protocole DEECIC tous les noeuds sont actifs.

En outre, plus le nombre de périodes augmente, le taux de couverture engendré par le protocole DEECIC diminue, ceci est dû aux défaillances des noeuds. En revanche, le protocole ECCoM maintient un taux de couverture quasi-totale, ceci car il équilibre la charge du réseau ; bien que des noeuds soient défaillants, d'autres seront sélectionnés pour assurer la couverture de la zone d'intérêt.

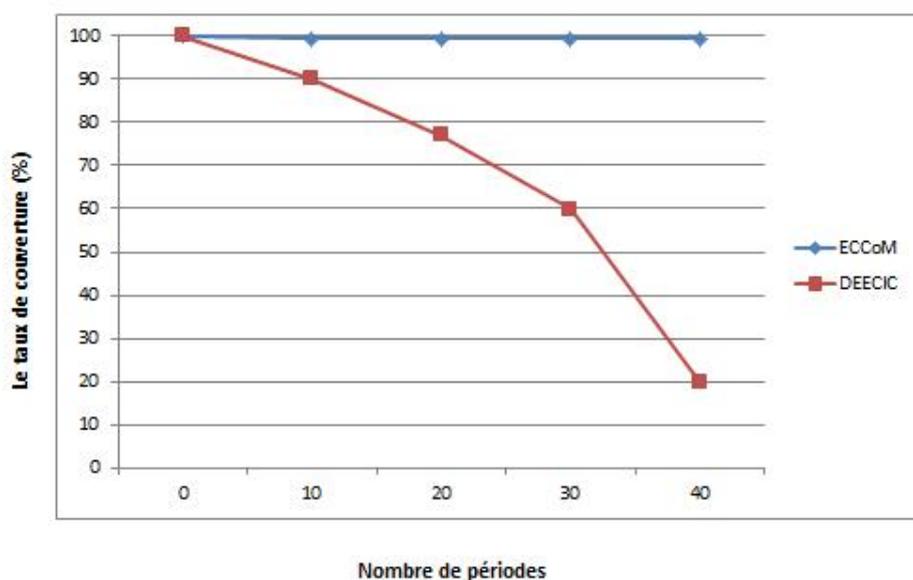


FIGURE 4.5: Taux de couverture en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés.

La figure 4.6 représente le taux de couverture moyen fourni par les deux protocoles DEECIC et ECoM, pour 200 noeuds déployés, en fonction du nombre de périodes.

A partir de la figure 4.6, on fait le même constat que celui de la figure 4.5 ; le protocole DEECIC assure une couverture totale au début, ensuite, plus le nombre de périodes augmente, le taux de couverture diminue à cause des défaillances. Le protocole ECoM, quant à lui, maintient une couverture quasi-totale malgré la variation du nombre de périodes.

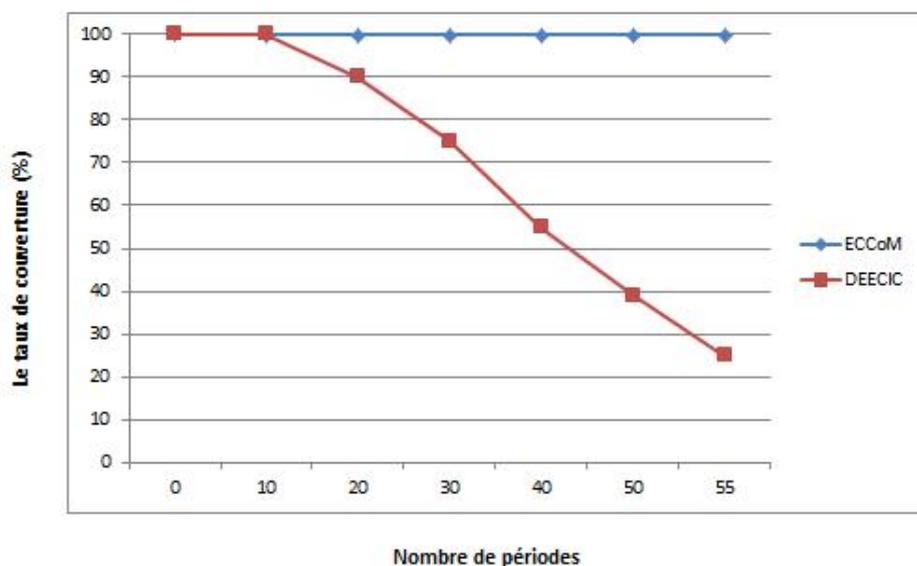


FIGURE 4.6: Taux de couverture en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés.

4.4.1.2 Nombre de noeuds actifs

Il est important d'avoir aussi peu de noeuds actifs que possible, sans pour autant induire de nombreuses communications. La figure 4.7 représente le nombre moyen de noeuds actifs induit par DEECIC et ECCoM, pour 100 noeuds déployés, durant chaque période d'activité.

On remarque que DEECIC engendre 100 noeuds actifs (tous les capteurs), tandis que le protocole ECCoM rivalise parfaitement avec 43 noeuds actifs et ce pour 5 périodes. Ensuite, malgré que le nombre de périodes d'activité augmente, ECCoM engendre toujours moins de noeuds actifs que DEECIC. Ceci est dû au fait que le protocole ECCoM ordonnance l'activité visant à mettre en état passif une partie des membres des clusters. À la quarantième période, le protocole DEECIC lui reste 19 noeuds actifs, les autres sont tous défaillants, contrairement à ECCoM qui n'engendre que 24 noeuds actifs. Cet écart en terme de noeuds actifs, permet à notre protocole d'assurer plus de couverture (voir la figure 4.5).

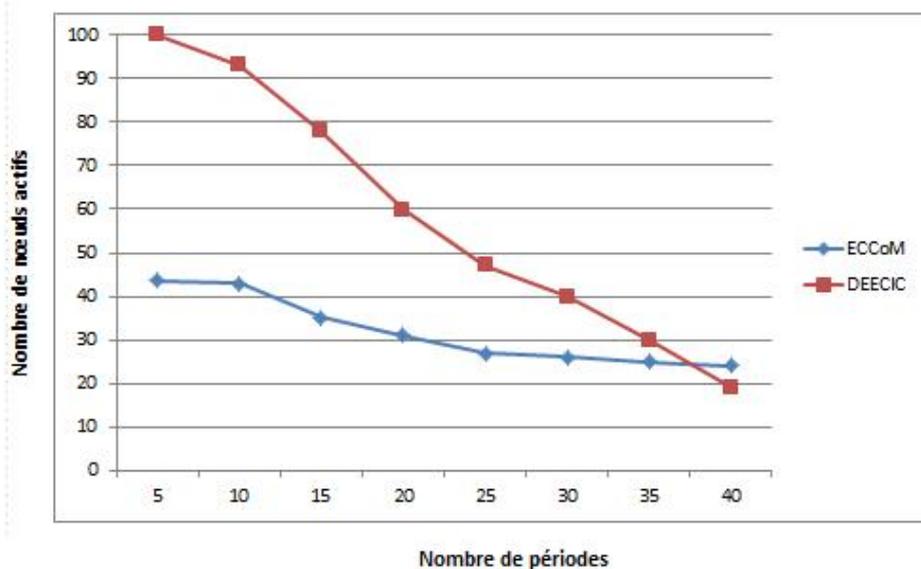


FIGURE 4.7: nombre de noeuds actifs en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés.

La figure 4.8 illustre la variation du nombre moyen de noeuds actifs en fonction du nombre de périodes, et ce pour 200 capteurs déployés.

On remarque que le nombre de capteurs actifs engendré par ECCoM est sans comparaison avec DEECIC (80 noeuds contre 200 noeuds respectivement, pour 10 périodes), ceci est dû à l'ordonnement d'activité qui est en faveur de notre protocole. De plus, lors de la 55ème période, le protocole DEECIC lui reste 20 noeuds actifs les autres sont tous défailants, contrairement au protocole ECCoM qui ordonnance l'activité des capteurs et engendre 49 noeuds actifs. De même que pour le cas précédent (100 capteurs déployés), cette différence en terme de noeuds actifs permet à ECCoM de maintenir une couverture quasi-totale (voir la figure 4.6).

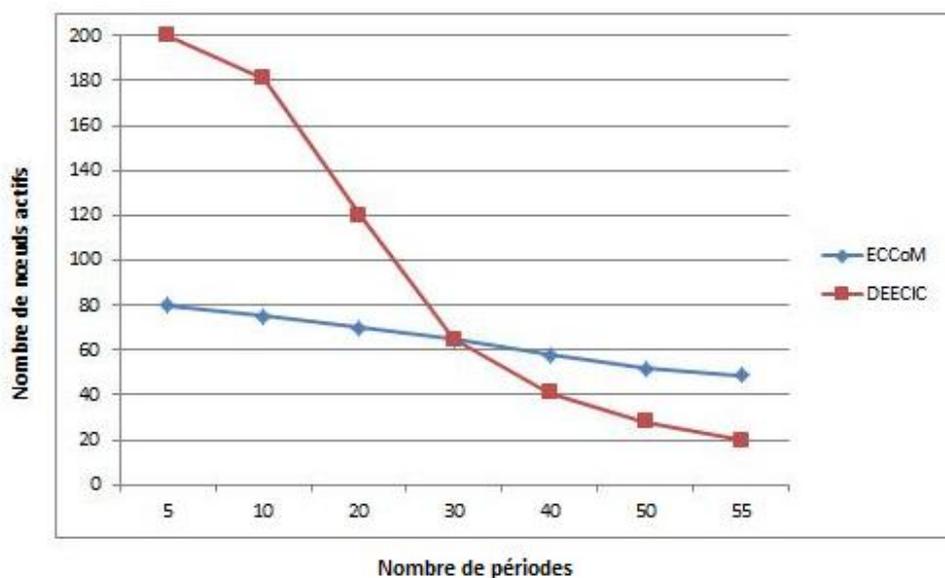


FIGURE 4.8: nombre de noeuds actifs en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés.

4.4.1.3 Consommation totale d'énergie

Afin de mesurer l'énergie moyenne consommée par ECCoM par rapport à DEECIC, nous avons utilisé le modèle radio de Heinzelman et al. [53]. On suppose que durant chaque période d'activité, les noeuds actifs consomment 15% de leur énergie initiale, et les clusters heads consomment 20% de leur énergie alors que l'énergie des noeuds passifs reste constante.

La figure 4.9 représente la variation de l'énergie totale consommée en fonction des périodes d'activité, pour 100 noeuds déployés.

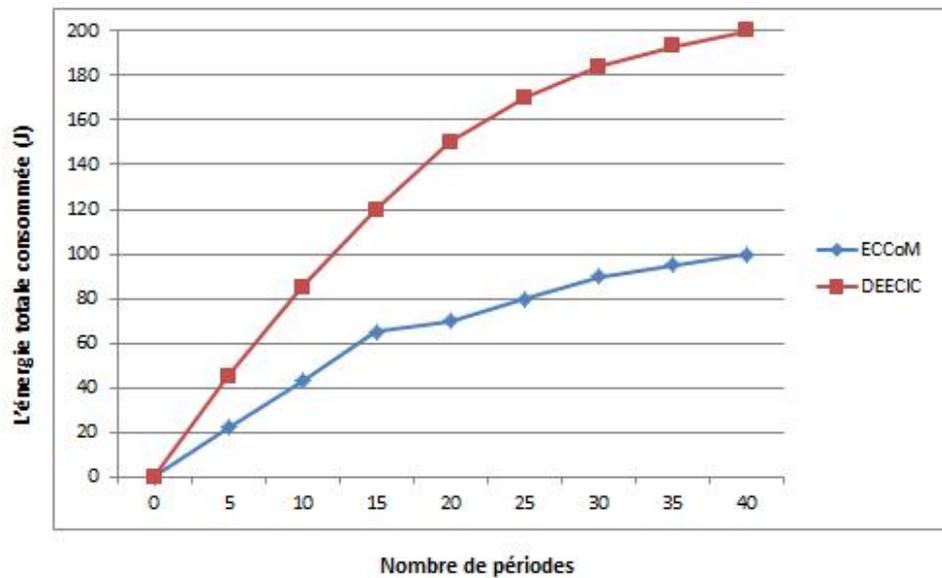


FIGURE 4.9: Consommation totale d'énergie en fonction du nombre de périodes, 100 capteurs déployés.

Pour DEECIC, l'énergie consommée augmente jusqu'à atteindre 200 joules avec l'augmentation des périodes d'activité, elle est largement importante par rapport à celle du protocole ECCoM (100 joules). La raison en est que dans le protocole DEECIC tous les noeuds sont actifs ce qui augmente la consommation énergétique globale. Cependant, ECCoM ordonnance l'activité pour mettre à l'état passif les noeuds redondants ce qui permet de minimiser les dépenses énergétiques.

La remarque la plus importante est que la différence en consommation d'énergie entre les deux protocoles, augmente avec l'augmentation du nombre de périodes. Ceci est justifié par le fait que le protocole ECCoM utilise moins de messages par rapport au protocole DEECIC (en particulier durant la phase de découverte).

La figure 4.10 représente l'énergie totale consommée en fonction de la variation du nombre de périodes d'activité, et ce pour 200 noeuds déployés.

On remarque que la consommation d'énergie de notre protocole ECCoM (195 joules) est moins importante en la comparant à celle consommée par DEECIC(390 joules). En effet c'est pour la même raison que le cas précédent qu'on a cet écart de consommation énergétique

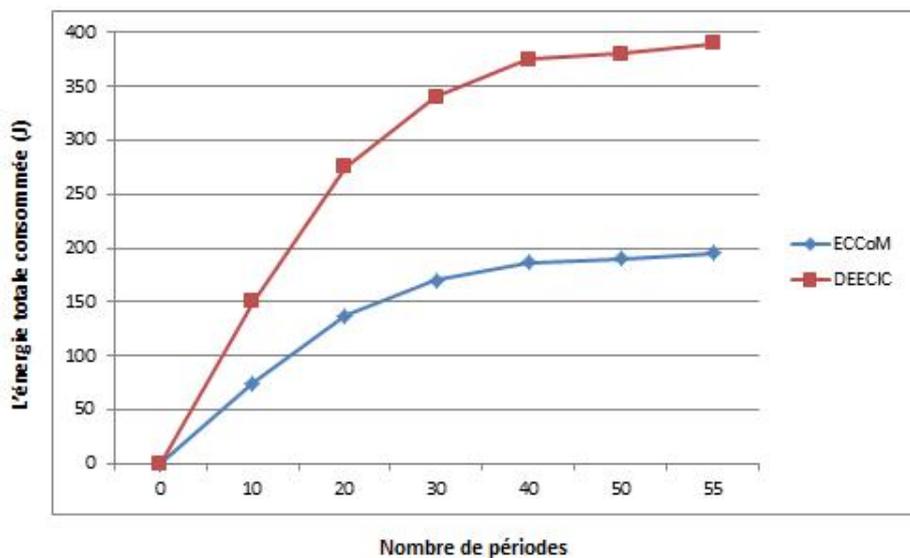


FIGURE 4.10: Consommation totale d'énergie en fonction du nombre de périodes, 200 capteurs déployés.

4.4.2 Variation du nombre de capteurs défaillants

Nous mesurons à présent, en fonction du nombre de capteurs défaillant le taux de couverture qui est le critère le plus important pour évaluer les performances des algorithmes d'ordonnancement d'activité prenant en considération la couverture.

La figure 4.11 illustre le taux moyen de couverture fourni par ECCoM et DEECIC, pour 200 noeuds déployés.

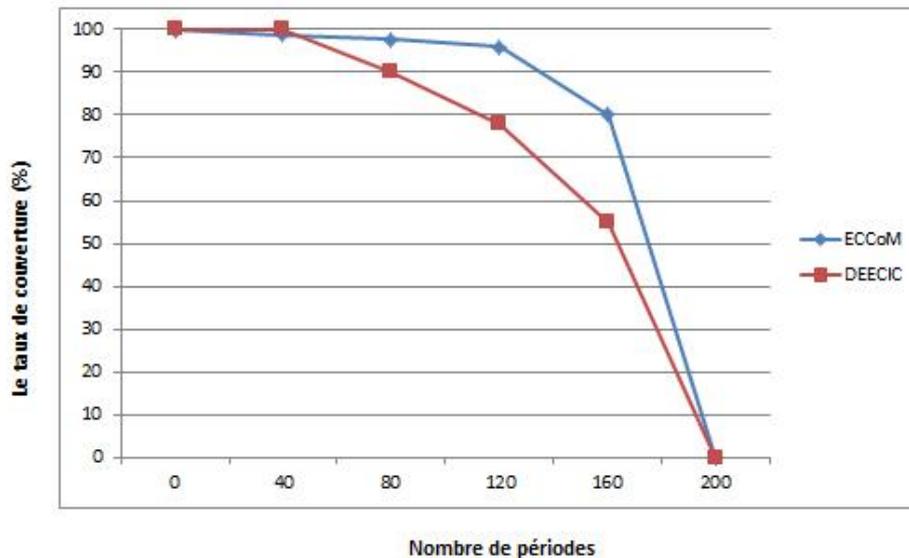


FIGURE 4.11: Variation du taux de couverture en fonction du nombre de noeuds défaillants, 200 capteurs déployés.

On remarque que lorsque le nombre de noeuds défaillant augmente le taux de couverture fourni au départ par le protocole DEECIC est à 100%, ceci est dû au fait tous les noeuds sont actifs et assure une couverture totale. En revanche le protocole ECCoM assure la couverture quasi-totale (99,83%), cette différence est justifiable car notre protocole met à l'état passif une partie des membres de clusters ce qui réduit légèrement le taux de couverture. En outre, plus le nombre de noeuds défaillants augmente, le taux de couverture engendré par les protocoles diminue. Ce résultat est attendu car les noeuds restant dans la zone à surveiller n'est pas suffisant pour assurer la couverture totale.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur la validation et l'analyse de performances du protocole proposé. Nous avons comparé l'approche proposée avec le protocole DEECIC en termes de taux de couverture, de nombre de noeuds actifs et d'énergie totale consommée.

D'après les résultats obtenus, le protocole ECCoM préserve une couverture quasi-totale avec un nombre réduit de noeuds actifs, ce qui lui permet de réduire la consommation énergétique qui est la contrainte la plus importante dans un réseau de capteurs.



Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de proposer une solution pour le problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Le déploiement dense et aléatoire des capteurs, engendre beaucoup de problèmes, parmi lesquels on cite la redondance ; une même portion de la zone d'intérêt est surveillée par plusieurs capteurs. Cette redondance engendre une consommation inutile d'énergie, ce qui résulte une diminution de la durée de vie du réseau. La technique d'ordonnement d'activité des capteurs, est largement utilisée comme solution à ce problème. Elle consiste à mettre dans l'état passif les capteurs redondants tout en maintenant la couverture totale de la zone d'intérêt par les noeuds actifs restants.

Nous avons présenté un protocole d'ordonnement qui préserve la couverture dans les réseaux de capteurs homogène. Nommé ECCoM (Energy-aware Clustering Coverage Maintenance), le protocole proposé se base sur le clustering. En effet, le clustering a plusieurs avantages, notamment la minimisation du trafic généré lors de l'acheminement des données, il facilite le partage des ressources et/ou la synchronisation au sein d'un cluster. Cette solution a deux caractéristiques principales : elle ne requiert pas la connaissance des positions géographiques des capteurs, ce qui permet d'utiliser des capteurs simples ne composant aucun dispositif complexe. Elle permet l'équilibrage de charge entre les capteurs par la division de la durée de vie en périodes d'activité. De plus à chaque période du processus d'ordonnement, l'activité des capteurs est en fonction de leur quantité d'énergie résiduelle et leur degré.

Nous avons développé un simulateur écrit en Java pour valider le protocole ECCoM. A travers la simulation, nous avons montré que la solution proposée rivalise parfaitement avec une solution existante, en termes de pourcentage de noeuds actifs et le pourcentage de clusters tout en produisant une couverture quasi totale. En plus, le protocole proposé conserve de l'énergie en équilibrant la charge du travail entre les capteurs du réseau.

Notre démarche a été de proposer une solution efficace, en termes d'énergie consommée, au problème de la couverture de surface. En réduisant le nombre de noeuds actifs nécessaires pour assurer une couverture quasi-totale, nous pensons avoir atteint cet objectif.

Comme perspectives de travail, nous évoquons les hypothèses à reconsidérer. En effet, parmi ces hypothèses est que les capteurs restent statiques après leur déploiement. En effet, il s'agira de réévaluer la couverture en fonction de la mobilité.

De même, nous avons toujours supposé que la synchronisation entre les noeuds était parfaite. Là encore les présupposés formulés dans les travaux existants pourraient être remis en cause et nous pourrions tendre vers des protocoles asynchrones.

Nous avons proposé une solution basée sur des capteurs homogène en terme de rayons de communication et de capture, il serait intéressant d'étendre ce protocole afin de supporter l'hétérogénéité des noeuds.

L'évaluation de notre protocole a été faite en utilisant notre propre simulateur écrit en JAVA, nous proposons de réévaluer les performances du protocole proposé en utilisant un simulateur plus adapté aux réseaux de capteurs tel que NS-2 [52], J-SIM [55].

Enfin, nous relâcherons l'hypothèse d'un réseau de capteurs à faible densité, et nous examinerons les résultats du protocole proposé, dans le cas d'un réseau dense.



bibliographie

Bibliographie

- [1] P. L. ZIANE KHODJA et M. YAZID. Analyse des performances du standard IEEE802.11 mode ad hoc dans un environnement radio : De la modélisation analytique à la simulation. Mémoire de fin d'études, Département informatique, Université de Bejaia, 2008.
- [2] N. A. NORRIS. Evaluation des performances du protocole 802.11 mode ad hoc. Thèse de magister, Département d'informatique, Université de Bejaia, 2006.
- [3] M. Lehsaini. Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. Thèse de doctorat en informatique, Université A.B Tlemcen et Université de Franche-Comté U.FR Sciences et Techniques École Doctorale SPIM, 2009.
- [4] Y. Sankarasubramaniam E. Cayirci I.F. Akyildiz, W. Su. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116, August 2002.
- [5] Y. Sankarasubramaniam I. F. Akyildiz, W. Su and E. I. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. IEEE Computer Networks, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [6] . Sankarasubramaniam I. F. Akyildiz, W. Su and E. I. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. IEEE Computer Networks, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [7] D. Gay J. Polastre R. Szewczyk A. Woo E. Brewer P. Levis, S. Madden and D. Culler. The Emergence of Networking Abstractions and Techniques in TinyOS. In Proc. of the First USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2004), March 2004.
- [8] Crossbow Technology Inc. [http : //www.xbow.com/](http://www.xbow.com/). Dernière consultation, janvier 2012.
- [9] L.KHELLADI et N.BADACHE. Les réseaux de capteurs : état de l'art .Thèse de doctorat, LSI- Département Informatique, Faculté Génie Electrique et Informatique, USTHB et Laboratoire des Logiciels de Base, CERIST, Février 2004.
- [10] Avec ou sans contact. [http ://sanscontact.wordpress.com//2012/01/page/3/](http://sanscontact.wordpress.com//2012/01/page/3/). Dernière consultation, janvier 2012.
- [11] Y. CHALLAL. Réseaux de Capteurs Sans Fils. Systemes intelligent pour le transport, 2008.

- [12] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless and C. Gill. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st international Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pages 28-39, 2003.
- [13] M. Cardei and J. Wu. Energy-efficient coverage problems in wireless ad hoc sensor networks. Elsevier Computer Communications Journal, 29 (4) : 413-420, 2006.
- [14] C. Shen, C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, Sensor information networking architecture and applications, IEEE Personal Communications, pp. 52-59, 2001 ;
- [15] M. Cardei and D. Z. Du. Improving Wireless Sensor Network Lifetime through Power Aware Organization. ACM Wireless Networks, 11(3) : 333-340, 2005.
- [16] Y. Li M. Cardei, M. T. Thai and W. Wu. Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks. In 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3 : 1976-1984, 2005.
- [17] S. Kumar, T. H. Lai and A. Arora. Barrier Coverage With Wireless Sensors. In Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 284-294, 2005.
- [18] S. Slijepcevic and M. Potkonjak. Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks. IEEE International Conference on Communications, 2 : 472-476, 2001.
- [19] P. Berman, G. Calinescu, C. Shah and A. Zelikovsky. Power Efficient Monitoring Management in Sensor Networks. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 4 : 2329-2334, 2004.
- [20] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [21] .Pazand et al. A Review of Redundancy Elimination Protocols for Wireless Sensor Networks. In ICCSA 2010, Part III, pages 336-351, 2010.
- [22] ANG WANG. Coverage Problems in Sensor Networks : A Survey. In ACM Computing Surveys, Vol. 43, No. 4, Article 32, October 2011.
- [23] D. Tian and N. D. Georganas, "A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks," in Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02), pp. 32-41, Atlanta, Ga, USA, September 2002.
- [24] T. Yan, T. He, and J. A. Stankovic, "Differentiated surveillance for sensor networks," in Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03), pp. 51-62, Los Angeles, Calif, USA, November 2003.
- [25] D. Simplot-Ryl A. Gallais, J. Carle and I. Stojmenovic. Localized sensor area coverage with low communication overhead. In IEEE transactions on mobile computing, 7(5) : 661-672, 2008.

- [26] Pedro Wightman and Miguel A. Labrador. A3 : A Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks. IEEE Globecom 2008, November 2008.
- [27] M. Krunz O. Younis and S. Ramasubramanian. Location-unaware coverage in wireless networks. Elsevier Ad Hoc Networks Journal, 6(7) : 1078-1097, 2008.
- [28] Heinzelman S. Soro, B. Wendi. Cluster head Election Techniques for Coverage Preservation in Wireless Sensor Networks. Department of Electrical and Computer Engineering. Ad Hoc Networks 7 (2009) pp 955-972, 2009.
- [29] N.Tezcan, W.Wang. TTS : A Two-Tiered Scheduling Algorithm for Wireless Sensor Networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2006) . Juin 2006.
- [30] B. Pazand and A. Datta. Minimum Dominating Sets for Solving the Coverage Problem in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the International Symposium on Ubiquitous Computing Systems (UCS 2006), pages 454-466, 2006.
- [31] F.Delicato, F.Protti, L.Pirmez, J.Ferreira de Rezende. An efficient heuristic for selecting active nodes in wireless sensor networks. Computer Network, 50 (18) :3701-3720, May 2006.
- [32] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein, Introduction to Algorithms, MIT Press, 2001.
- [33] C.FHUANG, L.C LO et Y.C TSENG. Decentralized Energy-Conserving and Coverage-Preserving Protocols for Wireless Sensor Networks .ACM Transactions on Sensor Networks, 2 (2) : 182-187, May 2006.
- [34] T. YAN, T.HE, et J. A. STANKOVIC, Differentiated surveillance for sensor networks. ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SeSys) : 51-62, 2003.
- [35] Jun Lu, Jinsu Wang, Tatsuya Suda. Scalable Coverage Maintenance for Dense Wireless Sensor Networks.EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007 (10) :13 pages, 2007.
- [36] S. Rizvi, H. Khaliq Qureshi, S.A. Khayam, V.Rakocevic, M.Rajajaran. An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks. Journal of Network and Computer Applications, 35(2) : 597-605 , Mars 2012.
- [37] T.Wi, T. Ssu et K.F. Determining Active Sensor Nodes for Complete Coverage without Location Information. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing 1(1-2) : 38-46, 2005.
- [38] T. Miyoshi ,V. Tran-Quang. A novel gossip-based sensing coverage algorithm for dense wireless sensor networks. Computer Networks, 53(13) :1286-1389, 2009.
- [39] A.P Chandrakasan, A.C. Smith, W.B. Heinzelman, An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks, IEEE Transaction on Wireless Communications 1 (4) (2004) 660-669.
- [40] K. P. Sampooram K. Rameshwaran. Efficient Scheduling Scheme Using Connected Dominating Set for Sensed Data Aggregators in Sensor Networks.Procedia Engineering ,30 (2012) :152 - 158 , 2011.

- [41] Jie Wu and Hailan Li, " On Calculating Connected Dominating Set for Efficient Routing in Ad Hoc Wireless Networks," in ACM, 1999.
- [42] Zhixin Liu, Qingchao Zheng, Liang Xu, Xinping Guan. A distributed energy-efficient clustering algorithm with improved coverage in wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 28(5) : 167-739, 2011.
- [43] A. Chamam, S. Pierre, A distributed energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks, *Computers et Electrical Engineering* 36 (2) (2010) 303-312.
- [44] A. Macii E. Macii M. Poncino R. Scarsi L. Benini, G. Castelli. A discrete-time battery model for high-level power. in : *Estimation Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition 2000 Proceedings*, Paris, France, March 2000, pp. 35-39.
- [45] J. Deng, Y. S. Han, W. B. Heinzelman and P. K. Varshney. Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) : 825-835, 2005.
- [46] Introduction to the global positioning system for GIS and TRAVERSE. Corvallis Microtechnology, Inc., 1996. Available : <http://www.cmtinc.com/gpsbook/>, consulter juin 2011.
- [47] Y. Zhou and K. Charkrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual force. in *Proc. Of IEEE Annual Conference on Computer Communications(IEEE INFOCOM)*, 2003.
- [48] J. Cui Z. Zhou and A. Bagtzoglou. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks. in *Proc. of IEEE Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, 2008.
- [49] Y. Zhou and K. Charkrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual force. in *Proc. Of IEEE Annual Conference on Computer Communications(IEEE INFOCOM)*, 2003.
- [50] S. Fdida and G. Hebuterne. *Méthodes exactes d'analyse de performance des réseaux*. 2004.
- [51] P. Erard and P. Deguenon. *Simulation par évènements discrets*. 1996.
- [52] The Network Simulator ns 2. Available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [53] A. Chandrakasan W-R. Heinzelman and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 3005-3014, Janvier 2000.
- [54] <http://www.eclipse.org/platform> dernière consultation le. 20/05/2012.
- [55] J-Sim Home page. [En ligne]. <http://sites.google.com/site/jsimofficial>.