

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



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

MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

En
Informatique

Option
Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

**Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour
les réseaux de capteurs sans fil**

Présenté par : M. GHEBBI Sofiane

Soutenu devant le jury composé de :

Président	M. LARBI Ali	Maitre assistant A	U. A/Mira Béjaia.
Encadreur	M. ABDELLAH Akilal	Maitre assistant B	U. A/Mira Béjaia.
Examineur	Dr. ATMANI Mouloud	Maitre assistant A	U. A/Mira Béjaia.
Examineur	Dr. BOUNOUNI Mahdi	Maitre assistant A	U. A/Mira Béjaia.

Béjaia, le 27 Juin 2016.

※ *Remerciements* ※

Pour commencer, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mon encadreur, Monsieur Abdellah Akilal, pour sa grande disponibilité, ses précieux conseils, ses encouragements et ses analyses qui ont guidé mes réflexions tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie aussi M. Larbi Ali de me faire l'honneur d'accepter la présidence du jury de ma soutenance.

Je remercie vivement Dr. Atmani Mouloud. Professeur qui a eu la gentillesse de m'accorder un entretien et qui m'a fait l'honneur de participer à mon jury.

Je remercie également Dr. Bounouni Mahdi d'avoir accepté de faire partie de mon jury de mémoire.

À tous ces intervenants, je présente mon respect et ma gratitude.

✧ *Dédicaces* ✧

À mes très chers parents, à ma sœur, à tous mes proches et amis qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

M. GHEBBI Sofiane

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des algorithmes	vi
Abréviations	1
Introduction générale	2
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Nœud capteur	3
1.3 Réseau de capteurs sans fil	4
1.4 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	5
1.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil	6
1.5.1 Pile protocolaire	6
1.6 Protocoles de routage plats et hiérarchiques	7
1.7 Conclusion	8
2 Protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs	9
2.1 Introduction	9
2.2 Protocoles de routage classiques	10
2.2.1 LEACH	10
2.2.2 LEACH-C	10
2.2.3 TEEN	11
2.2.4 APTEEN	11

2.2.5	PEGASIS	11
2.2.6	H-PEGASIS ou HIERARCHICAL PEGASIS	12
2.2.7	HEED	13
2.2.8	CBHRP	13
2.3	Protocoles récents	14
2.3.1	HEER	14
2.3.2	HEEC	14
2.4	Caractéristiques des protocoles étudiés	16
2.5	Conclusion	16
3	Proposition d'un protocole de routage hiérarchique	17
3.1	Introduction	17
3.2	Motivation	17
3.3	Caractéristiques du protocole DHCEEP	18
3.3.1	Taille des clusters	19
3.3.2	Routage	19
3.3.3	Déploiement des nœuds capteurs	19
3.3.4	Fonctions et rôles des nœuds capteurs	20
3.3.5	Mobilité	20
3.4	Introduction d'une formule déterministe de sélection des Clusters-Heads	21
3.5	Fonctionnement détaillé du protocole DHCEEP	22
3.5.1	Hypothèses	22
3.5.2	Étape 01 : Phase d'initialisation.	23
3.5.3	Étape 02 : Phase de sélection des Clusters-Heads.	23
3.5.4	Étape 03 : Phase de formation des Clusters.	26
3.5.5	Étape 04 : Phase de transmission.	26
3.6	Conclusion	28
4	Simulation et analyse des résultats	29
4.1	Introduction	29
4.2	Choix du simulateur	29
4.2.1	Choix de Matlab	30
4.3	Modèle de consommation d'énergie	30
4.4	Étapes de la simulation	31
4.4.1	Déploiement des nœuds capteurs	31

4.4.2	Création d'une table de voisinage locale et calcul du degré de chaque nœud capteur	32
4.4.3	Sélection des CHs et Création des clusters	33
4.5	Affichage des résultats de la simulation	34
4.5.1	Paramètres de la simulation	34
4.5.2	Résultats de la simulation	36
4.6	Conclusion	41
Conclusion et perspectives		42
Bibliographie		44

Table des figures

1.1	Architecture matérielle d'un nœud capteur.	3
1.2	Réseau de capteurs sans fil [3].	4
1.3	Classification des protocoles de routage dans les RCSFs.	5
1.4	Pile protocolaire.	7
2.1	Routage hiérarchique dans un RCSF.	9
3.1	Caractéristiques du protocole DHCEEP [20].	18
3.2	Illustration des deux déploiements : aléatoire et uniforme aléatoire.	20
3.3	Diagramme détaillant l'exécution du protocole DHCEEP.	27
4.1	Modèle radio introduit par W. Heinzelman et al. [13].	30
4.2	Déploiement aléatoire de 100 nœuds capteurs.	32
4.3	Création de la table de voisinage.	33
4.4	Calcul du degré de chaque nœud capteur.	33
4.5	Élection des CH et création des clusters associés.	34
4.6	Moyenne du nombre de nœuds morts en fonction des tours (configuration 1). . . .	38
4.7	Moyenne du nombre de nœuds morts en fonction des tours (configuration 2). . . .	39
4.8	Moyenne d'énergie des nœuds capteurs par tour (configuration 1).	40
4.9	Moyenne d'énergie des nœuds capteurs par tour (configuration 2).	41

Liste des tableaux

1.1	Comparatif entre le routage hiérarchique et plat [8].	8
2.1	Avantages et inconvénients des protocoles de routage.	15
2.2	Comparaison des protocoles de routage hiérarchique sélectionnés.	16
4.1	Paramètres de simulation.	35
4.2	Mort du premier nœud capteur (configuration 1).	36
4.3	Mort du premier nœud capteur (configuration 2).	37

Liste des Algorithmes

1	Phase d'initialisation.	23
2	Phase de calculs de la formule d'élection.	24
3	Phase de sélection des Clusters-Heads.	25

Notations et symboles

ADC	Analog to Digital Converters.
APTEEN	Adaptative Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.
CBHRP	Cluster Based Hierarchical Routing Protocol.
CH	Cluster Head.
DEEC	Distributed Energy Efficient Clustering algorithm.
DHCEEP	Deterministic Hierarchical Clustering Energy Efficient Protocol.
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector routing.
EDP	Energy x Delay Product.
HEEC	Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm for WSN.
HEED	Hybrid Energy Efficient Distributed clustering.
HEER	Hybrid Energy Efficient Reactive.
H-PEGASIS	Hierarchical Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems.
LEACH	Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy.
LEACH-C	Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy-Centralised.
OSI	Open Systems Interconnection.
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems.
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil.
SB	Station de Base.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol.
WSN	Wireless Sensor Network.

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, une nouvelle technologie promet de révolutionner l'interaction avec l'environnement physique qui nous entoure : les réseaux de capteurs sans fil. Constitués d'un ensemble de petits capteurs électroniques, autonomes, économiques et capables de communiquer entre eux sans fil. Ces derniers sont capables de recueillir et de fournir des informations utiles par l'agrégation des mesures prises sur une zone à surveiller. Plusieurs domaines d'application sont alors envisagés, allant du domaine médical jusqu'au domaine militaire, en passant par les applications environnementales et domotiques.

L'émergence de ce type de réseau a ouvert la voie au développement de nouveaux protocoles de routages toujours plus performant les uns que les autres. Mais principalement en raison de la taille miniaturisée des nœuds capteurs, plusieurs limitations surgissent (contrainte d'énergie, capacité réduite des nœuds, etc). Ces limitations motivent une grande partie des problématiques de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, en particulier la contrainte d'énergie qui est un problème fondamental. En effet, beaucoup de protocoles de routage se focalisent sur la conservation de l'énergie.

Dans ce document, un nouveau protocole DHCEEP est proposé. Ainsi, l'accent a été mis sur l'élaboration d'une nouvelle formule déterministe d'élection des CHs et de clusters de taille plus ou moins constante.

Le but de ce protocole est la mise en place d'un protocole de routage hiérarchique déterministe avec une meilleure répartition des charges qui solutionne fortement les exigences nécessaires à la résolution des lacunes de certains protocoles de routage hiérarchiques probabilistes.

Organisation du document :

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil ainsi qu'une classification des protocoles de routage dans les RCSFs.

Le deuxième chapitre présente l'état de l'art de la recherche sur quelques protocoles de routage hiérarchiques dans les RCSFs.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de notre protocole de routage hiérarchique DHCEEP.

Le quatrième et dernier chapitre présente les résultats de l'évaluation de performance du protocole proposé après simulation.

Nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale ainsi que des perspectives.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les progrès réalisés dans les domaines des technologies de communications sans fil et de la microélectronique [1] permettent de produire à un coût raisonnable des petits composants appelés micro-capteurs capables de collecter, de stocker, de traiter et d'effectuer une transmission sans fil des données collectées vers une station de base. Cette évolution a engendrée l'apparition d'un nouveau type de réseaux sans fil appelés réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les réseaux de capteurs sans fil, quelques unes de leurs caractéristiques et certains concepts associés. Cette description nous permettra de connaître la particularité des protocoles de routage conçus pour ce type de réseau.

1.2 Nœud capteur

Définition 1.2.1. D'après les auteurs de [2], c'est un dispositif à faible puissance capable de réaliser certains traitements, comme la collecte d'informations sensorielles et la communication avec d'autres nœuds (dispositifs) connectés sur le réseau (voir la figure 1.1).

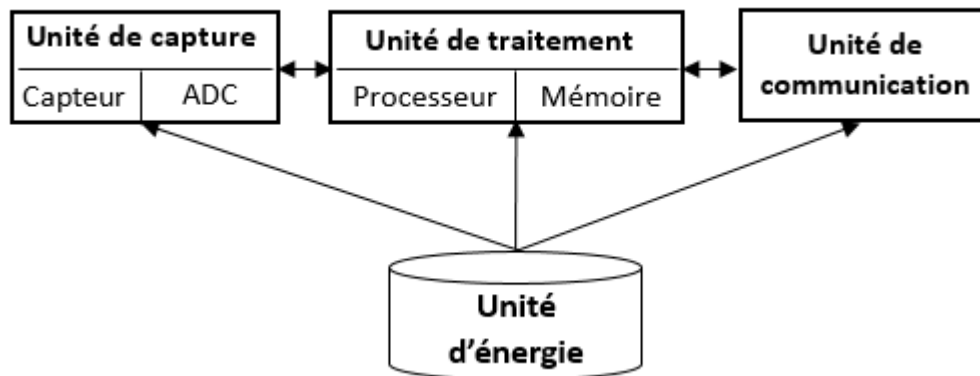


FIGURE 1.1 – Architecture matérielle d'un nœud capteur.

Il est principalement composé de quatre composantes de base [3, 4] :

- Unité de capture** : Elle est composée d'un capteur (dispositif de capture physique) et d'un convertisseur analogique-numérique appelé ADC. Le capteur produit des signaux analogiques en se basant sur le phénomène surveillé qui sont par la suite transformés en signal numérique grâce à l'ADC.
- Unité de traitement** : Elle comprend un processeur et une mémoire. Ses fonctions principales sont l'exécution de protocoles de communication et l'analyse des données captées.
- Unité de communication** : C'est un Emetteur/Récepteur radio qui effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un médium sans fil.
- Unité de contrôle d'énergie** : Ressource énergétique souvent matérialisée par une batterie. Généralement non rechargeable et non remplaçable, ce qui en fait la ressource la plus précieuse d'un capteur.

1.3 Réseau de capteurs sans fil

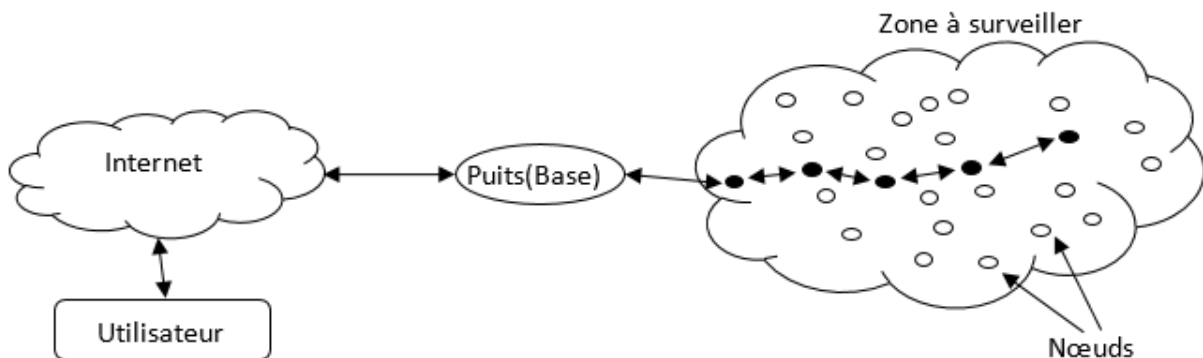


FIGURE 1.2 – Réseau de capteurs sans fil [3].

Les auteurs dans [5, 6] donnent la définition des RCSFs suivante :

Définition 1.3.1. Un RCSF (voir figure 1.2) est composé d'une multitude de nœuds capteurs spatialement répartis qui travaillent en collaboration via des liaisons sans fil pour communiquer (en mode Ad-Hoc) des informations recueillies sur les zones surveillées.

1.4 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Les méthodes employées dans les protocoles de routage pour les RCSFs peuvent être classées dans différents groupes selon leurs caractéristiques. Une classification possible est illustrée dans la figure 1.3.

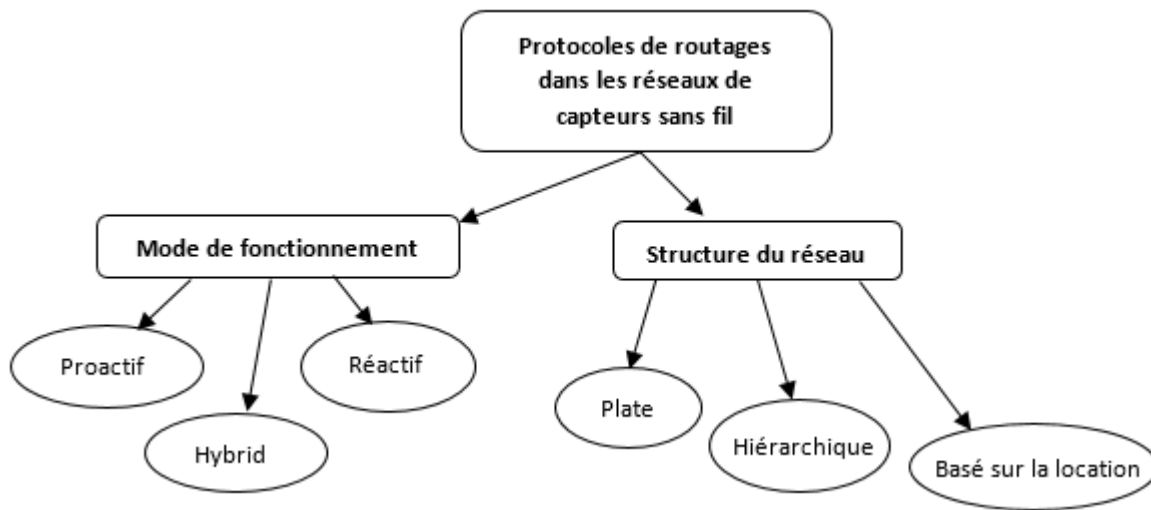


FIGURE 1.3 – Classification des protocoles de routage dans les RCSFs.

Les protocoles de routage dans les RCSFs peuvent être classés entre autre selon deux critères :

En se basant sur la structure principale du réseau :

1. Structure plate : Chaque nœud capteur joue le même rôle [7].
2. Hiérarchique : Les nœuds jouent un rôle différent dans le réseau [8].
3. Basé sur la localisation : La position des nœuds capteurs est exploitée dans le routage des données dans le réseau [8].

Selon leurs modes de fonctionnement :

1. Protocoles de routage Proactifs : Sont des protocoles qui fonctionnent selon des intervalles réguliers, ils sont plutôt destinés aux applications nécessitant un suivi périodique des données [14].

2. Protocoles de routage Réactif : (dit à la demande) Sont des protocoles qui assurent une réaction instantanée aux changements soudains et brusques. Il est ainsi préconisé pour les applications dites à contraintes temporelles [8].
3. Protocoles de routage Hybride : Sont des protocoles qui tirent parti des avantages des deux protocoles de routage précédents (proactifs et réactifs) [9].

1.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

La communication et le routage dans les RCSFs constituent un réel challenge en raison des caractéristiques intrinsèques qui distinguent ces réseaux des autres réseaux sans fil tel que les réseaux ad-hoc ou cellulaire, parmi lesquelles on retrouve [8] :

- L'impossibilité de construire un système d'adressage global pour le déploiement d'un grand nombre de nœuds de capteurs (surcharge de la maintenance des identifiants). Ainsi, les protocoles traditionnels basés sur IP ne peuvent pas être appliqués aux RCSFs.
- Contrairement aux réseaux de communication typiques, presque toutes les applications de réseaux de capteurs nécessitent le routage des données détectées à partir de plusieurs sources vers une SB particulière.
- Les nœuds de capteurs sont étroitement limités en termes d'énergie, de traitement et des capacités de stockage. Ainsi, ils ont besoin d'une gestion prudente des ressources.

1.5.1 Pile protocolaire

Cette pile protocolaire (figure 1.4) intègre 5 couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI auxquelles sont ajoutées trois autres plans consacrées à la gestion de la puissance énergétique, de la mobilité et des tâches. Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieure [10].

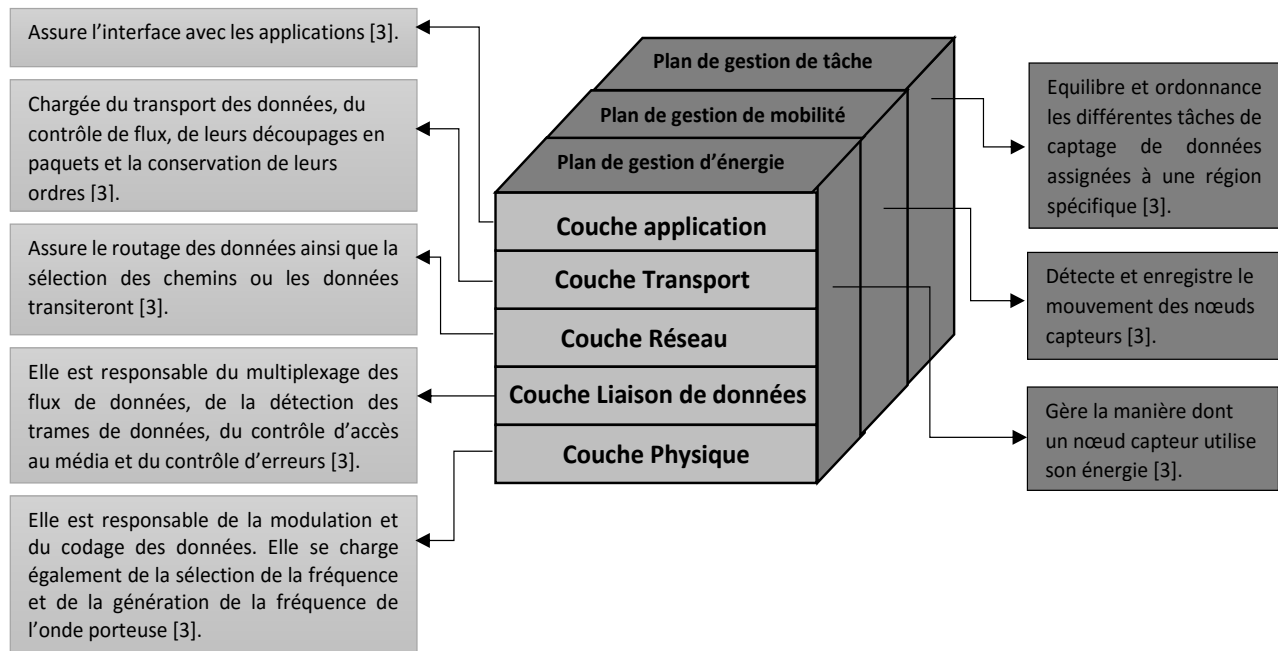


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire.

1.6 Protocoles de routage plats et hiérarchiques

Le routage hiérarchique, proposé à l'origine dans les réseaux filaires, est une technique bien connue avec des avantages spéciaux liés à l'évolutivité et à l'efficacité des communications. En tant que tel, le concept du routage hiérarchique est également utilisé dans le but d'effectuer un routage à basse consommation d'énergie dans les RCSFs [8].

Dans le routage plat tous les nœuds jouent le même rôle, tandis que dans une architecture hiérarchique, les nœuds ayant une grande quantité d'énergie peuvent être utilisés pour traiter et envoyer leurs données, alors que les nœuds ayant une basse quantité d'énergie peuvent être utilisés pour effectuer la détection à proximité de la cible. Cela signifie que la création de clusters et l'attribution des tâches spéciales comme l'agrégation et la fusion des données aux CHs peut grandement contribuer à l'évolutivité globale du système, de sa durée de vie, et de son efficacité énergétique [8].

Ci-dessous le tableau 1.1 comparatif des deux techniques de routages hiérarchique et plate :

Routage hiérarchique	Routage plat
Scheduling basé sur la réservation.	Scheduling basé sur la contention.
Collisions évitées.	Surcharge de collision présente.
Cycles d'utilisation réduit en raison de la veille périodique.	Cycles d'utilisation variables en contrôlant le temps de veille des nœuds.
Agrégation des données par le CH.	Les nœuds se trouvant sur un chemin multi-sauts agrègent les données provenant des voisins.
Routage simple mais pas optimal.	Le routage peut être rendu optimal mais avec une complexité supplémentaire.
Nécessite une synchronisation locale et globale.	Liens formés à la volée sans synchronisation.
Surcharge de la formation des clusters à travers le réseau.	Routes uniquement formées dans les régions disposant de données à transmettre.
Dissipation uniforme de l'énergie.	La dissipation d'énergie dépend des types de trafic.
La dissipation de l'énergie peut être contrôlée.	La dissipation d'énergie s'adapte au type de trafic.
Attribution équitable des canaux.	Équité non garantie.

TABLE 1.1 – Comparatif entre le routage hiérarchique et plat [8].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit le capteur ainsi que son architecture physique. On a également décrit brièvement ce qu'est un réseau de capteurs sans fil et ses caractéristiques. Une classification des protocoles de routage hiérarchique pour les RCSFs est exposée.

Dans le chapitre qui suit, Quelques protocoles de routages hiérarchiques utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil seront présentés et comparés.

Protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs

2.1 Introduction

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau ayant certaines contraintes énergétiques. Un des problèmes les plus cruciaux dans les RCSFs c'est la mise au point d'un système plus efficace en terme de consommation d'énergie. Dans les protocoles de routages hiérarchiques, le réseau est décomposé en clusters (voir figure 2.1). Chaque cluster est composé de nœuds capteurs, l'un d'eux joue le rôle de Cluster-Head, il a la responsabilité d'effectuer le routage depuis son cluster vers les autres clusters ou bien vers la station de base. Les données transitent depuis les clusters de niveau inférieur vers ceux du niveau supérieur [11].

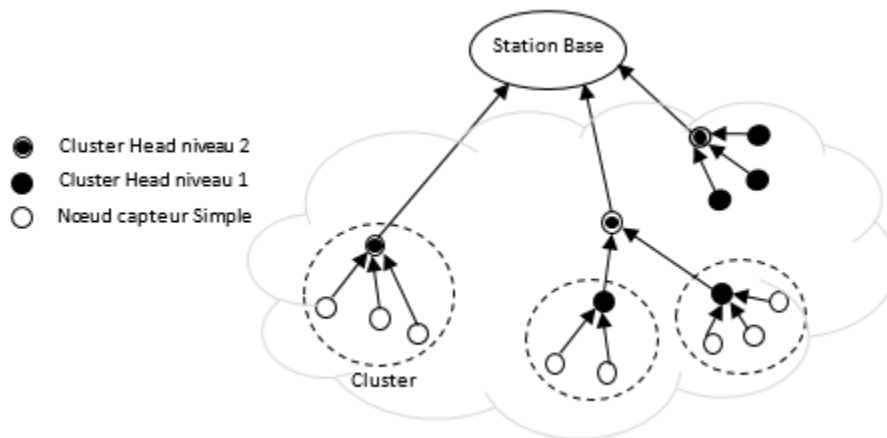


FIGURE 2.1 – Routage hiérarchique dans un RCSF.

Dans ce travail, on s'intéressera spécialement à la classe des protocoles qui se basent sur le routage hiérarchique. En effet, ce type de protocole contribue à l'évolutivité globale du système, à la réduction de la consommation d'énergie et à la prolongation de la durée de vie du réseau [12].

Cette partie examine des études et recherches existantes qui sont en corrélation avec notre thème.

2.2 Protocoles de routage classiques

Dans ce qui suit, les principales caractéristiques de quelques protocoles de routage hiérarchique seront décrites brièvement.

2.2.1 LEACH

Introduit par Heinzelman et Al. dans [13], LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) est un algorithme de clustering hiérarchique. C'est l'un des premiers protocoles à efficacité énergétique à être proposé et étudié, c'est également l'un des algorithmes de routages hiérarchiques les plus populaires pour les RCSFs [7]. On peut le classer dans la première classe de protocoles précédemment établie (ceux proactifs, section 1.4) en raison du temps de rapport prédéfini [14].

LEACH se déroule en rounds, chacun d'eux se compose de deux phases principales, celle de l'initialisation où les clusters sont organisés et construits et celle de la transmission où le transfert de données vers la SB se produit [13].

Dans chaque cluster l'un des nœuds capteurs joue le rôle d'un Cluster-Head. Le CH collecte les données provenant des membres de son cluster, effectue l'agrégation de ces dernières et les communique directement vers la SB [7].

Ce protocole a subi plusieurs mises à jour d'amélioration et de perfectionnement donnant naissance à de nouvelles versions de protocoles de routage hiérarchiques. Il fut également une inspiration pour de nombreux protocoles de routages bien qu'ils soient développés d'une manière indépendante.

2.2.2 LEACH-C

Les créateurs de LEACH ont mis en place une version centralisée baptisée LEACH-C qui est en fait une extension de l'algorithme de LEACH. En effet, ce dernier s'appuie toujours sur le clustering, d'ailleurs il en garde les principales caractéristiques à quelques différences près comme l'ajout de la méthode d'optimisation de recuit "simulé" (métaheuristique) qui sert à calculer la structure des clusters au niveau de la station de base [16]. De plus, dans LEACH-C la SB définit à chaque itération de l'algorithme le rôle de chaque nœud capteur, il peut être Cluster-Head ou bien un simple nœud capteur.

2.2.3 TEEN

Introduit par A. Manjeshwar et al. dans [14], TEEN (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*) est une hybridation du clustering hiérarchique et des protocoles centrés sur les données. Il utilise la stratégie de LEACH pour la création des clusters.

Le protocole TEEN convient pour les applications à contraintes temporelles. Ici le facteur clé est la valeur de l'attribut mesuré, Il a été conçu pour être sensible aux changements soudains des attributs, par conséquent il appartient à la classe des protocoles réactifs [14] précédemment définis. Il se trouve ainsi être le premier à avoir été créé pour satisfaire les besoins des réseaux réactifs [14].

Dans TEEN [17], au commencement d'un nouveau round, en plus des attributs conventionnels, et après l'établissement des clusters, le CH diffuse aux membres de son groupe deux paramètres supplémentaires, le seuil maximal et minimal. Les nœuds capteurs surveillent leurs environnements continuellement. Une fois que la valeur des données dépasse le seuil maximal, le nœud passe en mode transmission et transmet les données récoltées qui seront stockées ensuite dans une variable nommée SV (pour *Sensed Value*). Les nœuds commenceront à nouveau à transmettre les données récoltées seulement et seulement si ces deux conditions sont vérifiées [14] :

- La valeur de l'attribut détecté est supérieure au seuil maximal.
- La valeur courante de l'attribut détectée est égale ou supérieure au seuil minimal.

2.2.4 APTEEN

Proposé dans [15] par A. Manjeshwar et al., APTEEN (*Adaptative Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*) est une réforme de TEEN bâti sur la même architecture. Il allie la capture périodique de données et la réaction aux événements critiques, c'est pourquoi il est perçu comme étant un protocole polyvalent. Ainsi, en plus des deux attributs seuils vu précédemment, les CH diffusent pareillement un calendrier de transmission, ce qui donne le caractère de périodicité qui manquait à TEEN. De plus, les CHs effectuent l'agrégation des données qui servira à minimiser les déperditions d'énergie [17].

2.2.5 PEGASIS

PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) est l'une des améliorations de LEACH proposé par Lindsey et al. en l'an 2002 dans [18]. L'idée de base de ce protocole est que chaque nœud émet ou reçoit uniquement vers ou depuis des nœuds directement voisins à

ce dernier. Par la suite, à travers chaque round et à tour de rôle pendant ce dernier, chaque nœud devient le leader de la transmission et ce vers la SB [37, 8].

Contrairement aux protocoles vus précédemment, celui-ci forme des chaînes de nœuds de capteurs. La construction de ces dernières constitue la première phase du protocole qui se fait en deux étapes :

- Dans la première la SB et les nœuds capteurs sont auto-organisés en utilisant un algorithme de types glouton (algorithme permettant de choisir localement la meilleure solution).
- Dans la deuxième la SB diffuse auprès des nœuds capteurs des informations concernant la chaîne à établir, puis vient la formation de la chaîne qui débute par le nœud le plus éloigné de la SB jusqu'à ce que tous les nœuds soient inclus dans la chaîne.

Après la construction de la chaîne et au cours de la deuxième phase vient l'étape de la collecte de données où chaque nœud transmet ses informations à son nœud voisin le plus proche, puis celui-ci procède à l'agrégation de ses propres données avec celles préalablement réceptionnées et les transmet à son tour vers son voisin le plus proche. Chaque nœud réalise le même travail jusqu'à ce que l'information arrive à la SB [12].

Dans [8], une étude comparative entre LEACH et PEGASIS qui vise à déterminer le nombre de rounds exécutés avec 10%, 20%, 50% et 100% des nœuds morts en communication directe prouve par la simulation (100 nœuds capteurs disposés sur un champ de 50m x 50m) que :

- PEGASIS achève deux fois plus de rounds que LEACH. Un tel gain de performance est réalisé par l'élimination du surcoût causé par le processus de formation de clusters dans LEACH et par la réduction du nombre de transmissions et de réceptions grâce à l'utilisation de l'agrégation des données.
- PEGASIS montre également une meilleure performance avec l'augmentation de la taille du champ (100 à 300% plus performant que LEACH).

2.2.6 H-PEGASIS ou HIERARCHICAL PEGASIS

H-PEGASIS est une révision de PEGASIS. Ainsi, il se fixe pour objectif la diminution des délais de transmissions des paquets vers la station de base, et de plus, il suggère une solution au problème de la collecte de données en considérant la métrique EDP [19] (Energy x Delay Product). La transmission simultanée de messages est adoptée dans le but de réduire les délais dans PEGASIS.

Deux initiatives ont également été prises afin d'éviter toutes collisions ou interférences. La première étant l'incorporation d'un codage de signal (CDMA par exemple), et la deuxième consiste à permettre la transmission de données seulement aux nœuds capteurs spatialement séparés [17].

2.2.7 HEED

Proposé par O. Younis et al. [40], HEED (*Hybrid Energy Efficient Distributed clustering*) s'établi sur le schéma basic de LEACH. L'un de ses aspects le plus important, c'est la méthode avec laquelle sont sélectionnés les CHs.

Dans le but d'assurer un équilibrage de puissance énergétique, la construction des clusters se fait selon une combinaison de deux paramètres. L'un des paramètres dépend de l'énergie résiduelle des nœuds, le second dépend du coût des communications intra-cluster [5, 26, 38].

Les CHs sont élus périodiquement en se basant sur l'énergie résiduelle et le coût de la communication intra-cluster des nœuds candidats [20]. L'envoi des données depuis un Cluster-Head vers la SB se fait en sauts multiples.

2.2.8 CBHRP

Introduit par Md. Golam Rashed et al. dans [21], CBHRP (*Cluster Based Hierarchical Routing Protocol*) repose sur les fondements de base de LEACH.

CBHRP est un Protocole à deux niveaux de routages hiérarchiques. Il introduit un concept baptisé Head-Set qui comprend un CH actif et quelques nœuds associés au sein du cluster.

A un instant donné, seulement un membre du Head-Set est actif dans un cluster donné, ce dernier est chargé de l'envoi de messages à la SB, pendant ce temps-là, le reste du groupe est en mode veille [22].

Chaque phase de transfert de données consiste en différentes périodes. Chaque membre d'un ensemble de CHs devient un CH une seule fois durant une période. Au cours d'un round, plusieurs itérations se produisent. Tout nœud capteur devient membre de l'ensemble de CH une fois pendant ce dernier.

Après la série de tests d'efficacité menée dans [22], les auteurs ont conclu :

- Que la consommation d'énergie est réduite quand le nombre de cluster est argumenté.
- Ils ont observé que la plage optimale de clusters est de 20 à 60 clusters. Car dans le cas où le nombre de cluster est en dessous de la borne inférieure de la plage (20), les simples nœuds capteurs auront parfois à transmettre sur de plus grandes distances. Dans le cas contraire, plus de transmissions seront possibles avec un gain dans la dissipation d'énergie.

2.3 Protocoles récents

2.3.1 HEER

N. Javaid et al. ont proposé dans [23] le protocole HEER (*Hybrid Energy Efficient Reactive*) qui est une hybridation des deux protocoles TEEN et DEEC [41] destiné aux environnements homogènes.

Dans HEER [23], le choix des Clusters-Heads est basé sur le ratio entre l'énergie résiduelle du nœud et sur la moyenne de l'énergie du réseau. Dans le but d'obtenir une meilleure conservation d'énergie, les auteurs de HEER ont introduit le "Hard Threshold" (littéralement "seuil maximal") noté HT, et le "Soft Threshold" (littéralement "seuil minimal") noté ST.

2.3.2 HEEC

Proposé très récemment en l'an 2015 par P. Rajeshwari et al. dans [24], HEEC (*Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm for WSN*) utilise le concept du clustering.

Dans HEEC [24], la sélection du CH est effectuée par la SB, puis l'arbre de routage est construit et la méthode DSDV [44] (*Destination Sequenced Distance Vector Routing*) est adoptée pour le choix du chemin optimal. Le CH analyse tous les chemins et sélectionne le plus optimal depuis la source jusqu'à la destination.

Le concept de réélection de Cluster-Heads est également introduit :

- **Étape 01** : Initialement la SB choisit le nœud le plus proche possédant le plus haut niveau d'énergie résiduelle.
- **Étape 02** : À travers chaque round, la SB vérifie si le niveau d'énergie du CH du tour précédent est suffisant dans le but de transférer les paquets de données. Dans le cas contraire aller à l'étape 03.
- **Étape 03** : La SB analyse à nouveau le niveau d'énergie ainsi que la distance et la vivacité des nœuds du réseau.
- **Étape 04** : Le nœud capteur satisfaisant au mieux ces paramètres est élue.
- **Étape 05** : L'identité du nouveau CH est diffusée aux restes des nœuds du réseau, puis ces derniers construisent leur nouvelle table des nœuds voisins et sélectionnent leurs CHs.

Ci-dessous (table 2.1), les avantages et les inconvénients des protocoles vu précédemment :

Protocole	Avantages	Inconvénients
LEACH (2000)	<ul style="list-style-type: none"> • L'auto-configuration des clusters se fait indépendamment de la station de base (algorithme distribué) [39]. • Fournit la scalabilité (évolutivité) [7]. • Il ne requiert pas d'information sur la localisation des nœuds capteurs dans le réseau afin de former les groupes [7]. • Réduction du nombre global de communication grâce aux traitements (agrégation, compression) locaux des données [13]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cluster-Heads non uniformément distribués [30]. • Repose en grande partie sur les CHs plutôt que sur les simples nœuds [7]. • Non prise en considération de l'énergie résiduelle de chaque nœud dans la sélection du Cluster-Head [30]. • Pas de communication inter-clusters [7]. • Les CHs éloignés de la SB meurent plus rapidement [13].
TEEN (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • Convient aux applications dites à contraintes temporelle [14]. • Moins de transmission de données [8]. • Plus économe en énergie que les protocoles proactifs (la transmission d'un message consomme plus que la collecte d'informations sensorielles) [8]. 	<ul style="list-style-type: none"> • La possibilité que la SB ne soit pas en mesure de faire la distinction entre les nœuds morts et ceux en vie [5]. • Inadéquat pour les applications exigeant des rapports périodiques [37]. • Un nœud peut attendre pendant son slot de temps. Ce dernier peut être gaspillé si le nœud n'a aucune donnée à transmettre [9].
APTEEN (2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison des deux politiques proactive et réactive [37]. • Le support de trois types de requêtes : historiques, persistantes, obtention d'un instantané de la vue du réseau actuelle [9]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité additionnelle requise pour la mise en place des paramètres supplémentaires [9].
PEGASIS	<ul style="list-style-type: none"> • La coordination locale entre nœuds capteurs rapprochés [27]. • Améliore la configuration en clusters et la méthode de délivrance des données [27]. • Elimine la surcharge due à la formation dynamique de clusters [8]. • Diminue le nombre de transmission et d'émission en effectuant l'agrégation des données [8]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Délais excessif de transmission pour les nœuds les plus distants de la chaîne [8, 17]. • Chaque nœud requiert des informations sur le réseau [9].
HEED (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • La distribution d'énergie selon HEED prolonge la durée de vie des nœuds capteurs dans le réseau stabilisant ainsi le nœud voisin [11]. • L'utilisation de deux paramètres importants dans le choix des CHs [20]. • HEED n'a pas besoin de nœuds possédant des capacités spéciales comme la connaissance de la localisation [38]. • Afin de former les clusters, les nœuds ont uniquement besoin d'information locale (nœuds voisins) [38]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tout comme LEACH, l'élection périodique des CHs requiert de l'énergie supplémentaire pour la reconstruction des clusters [38, 20]. • HEED souffre de surcharge car il a besoin de plusieurs itérations pour former les clusters [20]. • Ce protocole se focalise plutôt sur la prolongation de la durée de vie du réseau, plutôt que sur l'ensemble des besoins d'un réseau de capteurs [38].
CBHRP (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Introduction du concept de Head-Set [21]. • Meilleure performance que LEACH dans le contexte de la consommation d'énergie, de la transmission de trame et de la durée de vie du réseau de capteurs [21]. 	<ul style="list-style-type: none"> • CBHRP a besoin d'être au courant de l'état des autres nœuds du réseau. La transmission de données coûtera de l'énergie pour l'émetteur ainsi qu'à ses voisins [21].
HEER (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Plus efficace que TEEN et DEEC [23]. • Réduit le nombre de transmissions [23]. • Réduit la consommation d'énergie, en distribuant la charge de tâches à tous les nœuds à grande énergie puis aux nœuds à faibles énergies [29]. • HEER augmente la durée de la période de stabilité (c'est l'intervalle de temps qui s'étend du début des opérations du réseau jusqu'à la mort du premier nœud) [11]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si le nombre de transmissions augmente, la durée de vie du réseau diminuera [23].
HEEC (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation d'une méthode de sélection de chemin optimal [38]. • Introduction du concept de réélection de CH [38]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de messages échangés [38].

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients des protocoles de routage.

2.4 Caractéristiques des protocoles étudiés

Une étude de quelques protocoles de routage hiérarchiques pour les réseaux de capteurs sans fil a été établie. Cela a permis l'identification des principales caractéristiques et différences de ces protocoles. En effet, certains de ces protocoles se basent sur la structure en cluster, d'autres sur la structure en chaîne. Certains protocoles exigent des informations concernant le réseau afin de mener à bien le processus de clusterisation. D'autres protocoles exigent des contraintes matérielles, comme la possibilité de varier la puissance de transmission du nœud. Le tableau 2.2 ci-dessous résume les caractéristiques principales des protocoles étudiés :

Protocoles	Type de hiérarchie	Information exigée sur le réseau	Taille prédéfinie des clusters	Routage optimal
LEACH [13]	Cluster	-	Non	Non
TEEN [14]	Cluster	-	Non	Non
APTEEN [15]	Cluster	-	Non	Non
PEGASIS [18]	Chaîne	-	Non	Non
H-PEGASIS [17]	Cluster+Chaîne	-	Non	Non
HEED [40]	Cluster	-Énergie résiduelle. -Degré des nœuds.	Non	Multi-sauts
CBHRP [22]	Cluster	-	Oui	Non
HEER [23]	Cluster	-Énergie résiduelle.	Non	Non
HEEC [24]	Cluster	-Énergie résiduelle. -Distance de la SB.	Non	Destination Sequenced Distance Vector Routing (DSDV [44])

TABLE 2.2 – Comparaison des protocoles de routage hiérarchique sélectionnés.

2.5 Conclusion

On a décrit dans les sections précédentes des protocoles de routage hiérarchiques pour les réseaux de capteurs sans fil. Les travaux actuels concernant le routage hiérarchique nous ont permis l'identification de deux structures principales d'organisation : les clusters et les chaînes.

Les réseaux visés par notre proposition de protocole de routage hiérarchique basé sur une structure en clusters, comprennent des nœuds capteurs qui ne disposent pas d'information de localisation. Ils sont fixes et ont un rayon de communication normalisé. Cependant, ces derniers peuvent toujours varier leurs puissances de transmission.

Dans le chapitre suivant, nous allons introduire notre proposition de protocole de routage hiérarchique dans les RCSFs appelé DHCEEP (*Deterministic Hierarchical Clustering Energy Efficient Protocol*).

Proposition d'un protocole de routage hiérarchique

3.1 Introduction

Dans le contexte actuel de la recherche effectuée dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, il est à remarquer que la plupart des protocoles de routage hiérarchiques existants utilisent des méthodes de Clustering se basant sur des probabilités (à caractère aléatoire), ce qui peut se révéler être un inconvénient non négligeable.

3.2 Motivation

Des études ont démontré que l'utilisation d'une stratégie de sélection et de rotation aléatoire des CHs souffre de plusieurs lacunes, dont voici les principaux éléments :

- Les auteurs dans [32] ont démontré que l'inconvénient de base des protocoles dit à caractère probabiliste, notamment LEACH, c'est la mauvaise distribution des Clusters-Heads. Il est ainsi possible que les CHs élus soient concentrés dans une partie du réseau, ce qui peut amener certains nœuds à ne pas avoir de CHs dans leurs rayons de portée (voisinage). De plus, la rotation du rôle de CH n'est pas toujours uniforme, ce qui influence parfois la distribution de la consommation d'énergie.
- Les auteurs dans [31] et [2] ont démontré qu'en raison de la stratégie de sélection des CHs basée sur des probabilités, le nombre de CHs dans LEACH ainsi que dans les autres protocoles de sa classe (utilisant le même processus de clustering) n'est pas garanti d'être égal à la valeur optimale souhaitée. La probabilité qu'il y ait un seul CH ou pas du tout est élevée lorsque le nombre désiré de CHs est faible.

Ainsi, un processus de Clustering déterministe, permettra de remédier au problème de la variabilité de la taille des clusters qui influe négativement sur la répartition de la charge sur les CHs.

L'utilisation d'un processus de sélection de CHs et de construction des clusters déterministes résoudrait et réduirait fortement les inconvénients des méthodes de sélections de CHs aléatoires.

Ainsi, dans ce document, on a mis l'accent sur l'élaboration d'une nouvelle formule déterministe d'élection des CHs et de construction de clusters de taille plus ou moins constante dans le but est la mise en place d'un protocole de routage hiérarchique déterministe qui solutionne fortement les exigences nécessaires à la résolution des lacunes des protocoles de routage hiérarchique probabiliste.

3.3 Caractéristiques du protocole DHCEEP

Cette schématisation (figure 3.1) est inspirée de la taxonomie des méthodes de clustering dans les RCSFs introduite dans [20].

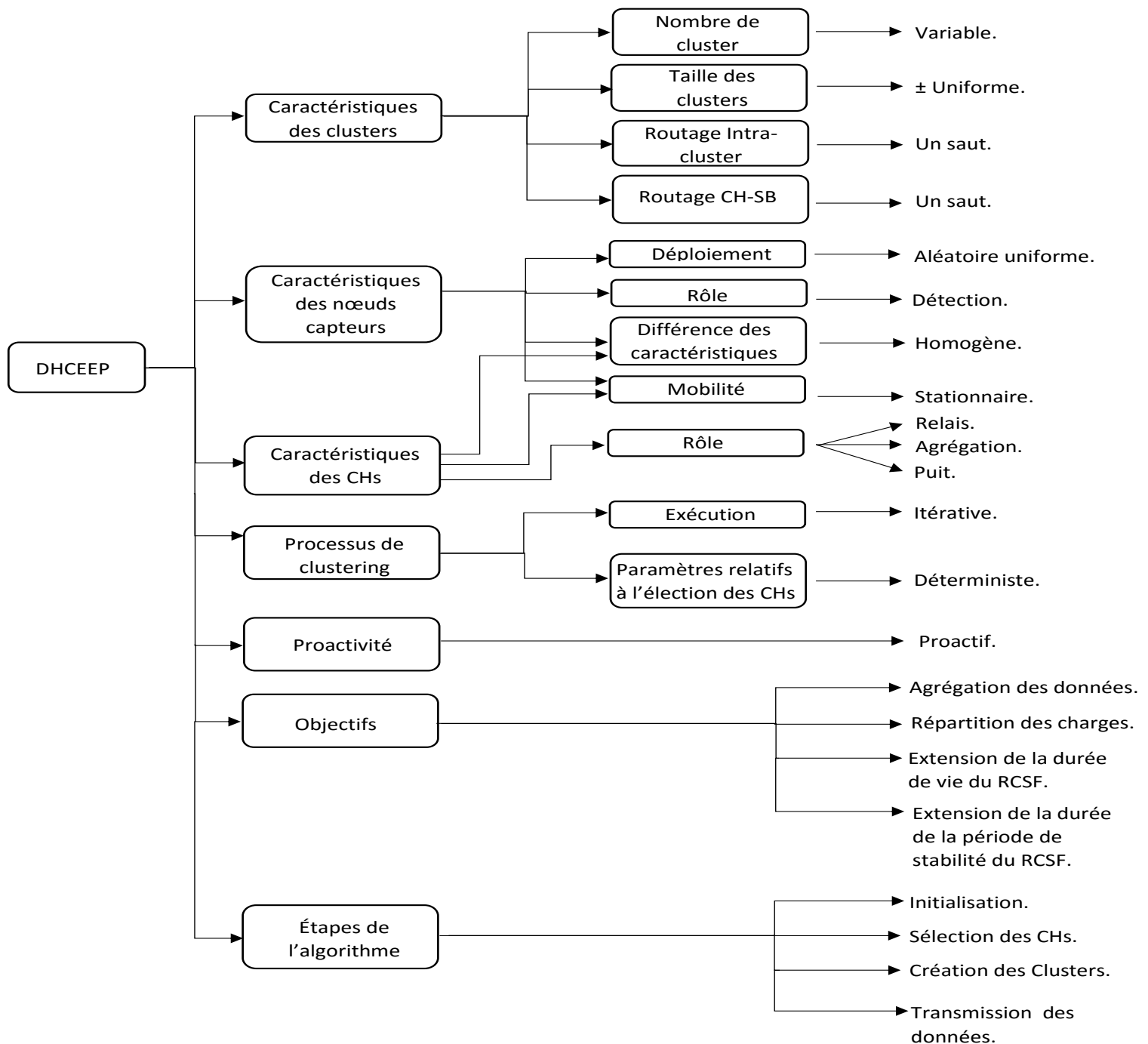


FIGURE 3.1 – Caractéristiques du protocole DHCEEP [20].

3.3.1 Taille des clusters

Une des raisons de la mort précoce d'un réseau de capteurs sans fil est la répartition déséquilibrée [29, 43] des nœuds dans un cluster, ce qui peut également conduire à une surcharge des CHs et au partitionnement du réseau. Afin d'y remédier et de gérer le nombre de nœuds constituant les clusters, la taille des clusters est limitée à l'aide d'une valeur dite optimale de ce nombre qui est fixée par la station de base, et ce dans le but d'obtenir des tailles plus ou moins uniformes afin de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs sans fil.

Étant donné :

- T_{op} : Représentant la taille optimale des clusters constituant un réseau de capteurs sans fil.
- α : Représente une marge d'erreur.

La taille d'un cluster T est définie tel que :

$$T + \alpha \leq T_{op} \quad (3.1)$$

3.3.2 Routage

Le routage des données dans notre protocole se réalise à deux niveaux : Intra-clusters et CH-SB. Les nœuds envoient leurs paquets aux CHs qui les transmettent à la station de base.

3.3.3 Déploiement des nœuds capteurs

Le déploiement sera de type aléatoire uniforme.

Aléatoire, car l'habilité de déployer les nœuds capteurs aléatoirement sans le besoin de le faire manuellement est l'un des aspects le plus attrayant des RCSFs.

Uniforme, afin de maximiser la couverture et la densité de la zone d'intérêt, et ainsi minimiser les trous de couverture.

Ci-dessous (figure 3.2) un exemple illustratif de deux déploiements possibles pour un même nombre de nœuds capteurs (aléatoire et aléatoire uniforme) :

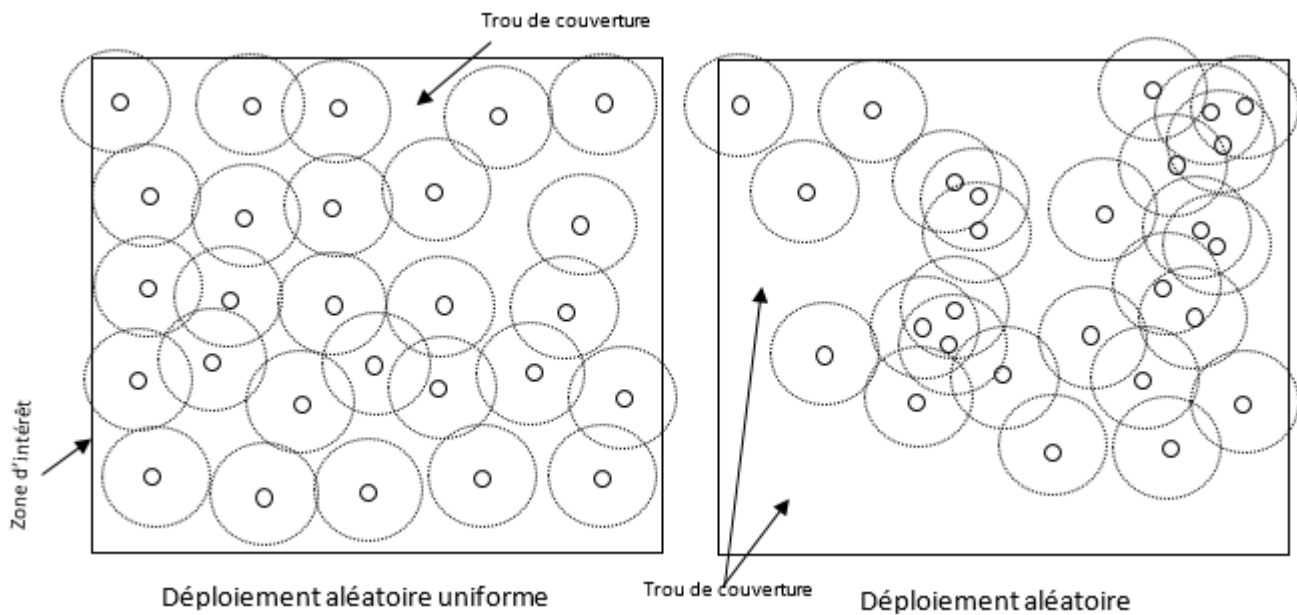


FIGURE 3.2 – Illustration des deux déploiements : aléatoire et uniforme aléatoire.

3.3.4 Fonctions et rôles des nœuds capteurs

- a- **Fonctions** : Les nœuds capteurs sont homogènes (ils ont tous les mêmes fonctions et caractéristiques techniques).
- b- **Rôles** : En plus de leurs fonctions de base (producteurs d'informations), tous les nœuds capteurs jouent le rôle de relais. Un sous ensemble des capteurs déployés se voit attribuer le rôle de CH pour chacun des nœuds capteurs. Ces derniers effectuent l'agrégation des données, ils représentent un puits par rapport aux membres des clusters respectifs de chaque CH.

3.3.5 Mobilité

Si la mobilité des nœuds capteurs sans fil est supposée, les composantes de chaque cluster vont dynamiquement changer forçant les clusters à évoluer à travers le temps, ce qui peut requérir une maintenance continue. En effet, lorsque la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire. Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de topologie, donc une dépense importante d'énergie.

Dans le cas contraire (nœuds capteurs stationnaires), nous sommes normalement amenés à la

stabilité des clusters ce qui mène vers une gestion plus facile des communications du réseau (intra-clusters et inter-clusters), notre choix se portera sur l'utilisation de nœuds capteurs stationnaires.

3.4 Introduction d'une formule déterministe de sélection des Clusters-Heads

Une première approche visant l'augmentation de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil serait la prise en compte dans la formule de sélection de la métrique correspondante à l'énergie résiduelle E_{res} (niveau d'énergie restant) de chaque nœud capteur i (voir équation 3.2).

$$Val_i = E_{res}(i) \quad (3.2)$$

Où pour chaque nœud capteur i , E_{res} représente le niveau d'énergie restant et Val_i contient le résultat final.

Dans le but d'avoir une meilleure répartition de la charge des tâches, il est important de réduire les chances de devenir CH des nœuds l'ayant déjà été. De ce fait, on divise l'énergie résiduelle $E_{res}(i)$ par $Nb_{CH}(i)$:

$$Val_i = \left(\frac{E_{res}(i)}{Nb_{CH}(i)} \right) \quad (3.3)$$

Où $Nb_{CH}(i)$ représente le nombre de fois qu'un nœud capteurs i a été CH.

Afin d'éviter l'impossibilité de Val_i dans le cas où $Nb_{CH}(i)=0$, initialement, on pose $Nb_{CH}(i)=1$. Dès lors, $(Nb_{CH}(i) - 1)$ désigne le nombre de fois qu'un nœud i a été élu CH au cours des rounds précédents.

Grâce à ce rapport, plus un nœud possèdera une grande valeur $Nb_{CH}(i)$, moins il aura de chance de devenir CH à nouveau.

Toujours dans le but d'améliorer la répartition de la charge des tâches, il serait plus approprié d'avoir des Clusters ayant plus ou moins la même taille, ce qui aurait pour effet d'homogénéiser le nombre de tâches effectuées par les différents CHs, ce qui par la suite, permettrait d'avoir au final plus moins les mêmes déperditions en énergie au niveau des Clusters. Ainsi, la durée de vie globale du réseau sera maximisée, le risque de perdre des parties du réseau avant d'autres sera fortement revue en baisse.

Pour ce faire, la formule 3.3 est complétée comme suit :

$$Val_i = \left(\frac{Deg(i)}{N} * \frac{E_{res}(i)}{Nb_{CH}(i)} \right) \quad (3.4)$$

Où N représente la taille optimale des clusters et $Deg(i)$ représente le degré du nœud capteur i

Ainsi, le rapport $\frac{Deg(i)}{N}$ favoriserait le nœud capteur i pouvant atteindre au mieux la taille optimale N visée des Clusters ($Deg(i)$ représente le degré d'un nœud capteur i).

Ainsi la formule précédente (équation 3.4) donnerait pour gagnant le nœud i possédant la plus grande valeur de Val_i . Donc, le nœud possédant le plus haut niveau d'énergie résiduelle parmi ses voisins, ayant été le moins de fois CH et celui qui peut atteindre au mieux la taille optimale des clusters (ce qui va permettre l'obtention plus ou moins de clusters uniforme en terme de taille, et ainsi permettra une répartition plus ou moins égale de la charge sur les Clusters-Heads du réseau tout entier).

Pour le cas où on aurait des résultats Ex-aequo, Le nœud i possédant la plus grande identité selon un ordre numérique s'autoproclame CH (cela reste déterministe).

3.5 Fonctionnement détaillé du protocole DHCEEP

Dans cette section, un nouveau protocole de routage hiérarchique appelé DHCEEP (*Deterministic Hierarchical Clustering Energy Efficient Protocol*) est présenté.

3.5.1 Hypothèses

Ici, les hypothèses de base supposées lors de la construction du protocole sont présentées comme suit :

- **Hypothèse 01** : Les nœuds possèdent des ressources limitées (le capteur est limité en terme de puissance et il est contraint en terme d'énergie).
- **Hypothèse 02** : Tous les nœuds capteurs possèdent des identifiants numériques différents.
- **Hypothèse 03** : Tous les nœuds capteurs surveillent l'environnement à intervalle fixe, et ils disposent toujours de données à envoyer à l'utilisateur final.
- **Hypothèse 04** : La SB possède une réserve d'énergie illimitée et une puissance d'émission conséquente. De ce fait, tous les nœuds capteurs sont à portée de la SB.
- **Hypothèse 05** : Les nœuds peuvent utiliser si besoin y est, le contrôle de puissance afin de réguler la puissance d'émission en fonction de la distance de transmission. Ainsi, un CH peut directement effectuer une transmission vers la SB.
- **Hypothèse 06** : Une fois déployés, les nœuds capteurs et la SB sont stationnaires.
- **Hypothèse 07** : Les nœuds capteurs disposent d'une mémoire suffisante afin d'éviter toute congestion.

Le protocole est détaillé comme suit :

3.5.2 Étape 01 : Phase d'initialisation.

La Station de Base initie l'algorithme par l'envoi d'un message d'initialisation \mathbf{M}_{init} à tous les nœuds capteurs constituant le réseau. Ce dernier contient la taille optimale d'un cluster \mathbf{N} . Ci-dessous, le pseudo-algorithme associé (algorithme 1).

Paramètres :

\mathbf{N}_i : Nœud Capteur.

\mathbf{SB} : Station Base.

\mathbf{M}_{init} : Contient \mathbf{N} .

Algorithme 1: Phase d'initialisation.

Input : \mathbf{M}_{init} .

Output : Diffusion de \mathbf{M}_{init} à tout les \mathbf{N}_i du RCSF.

```

1 for  $i = 1$  to  $Nb_{noeuds}$  do
2   | La  $\mathbf{SB}$  envoie le message  $\mathbf{M}_{init}$  à destination de tous les  $\mathbf{N}_i$  du réseau.;
3 end for
```

3.5.3 Étape 02 : Phase de sélection des Clusters-Heads.

Tout nœud capteur après la réception d'un message \mathbf{M}_{init} , effectue la diffusion d'un message **HELLO** contenant son identifiant dans son rayon de portée. Après l'exécution de cette opération par chaque nœud capteur du réseau, la création d'une table de voisinage locale par chaque \mathbf{N}_i devient possible. Cette dernière est mise à jour au début de chaque tour.

A la fin de cette opération, tout nœud capteur faisant partie du réseau connaît ses voisins directs appartenant à son rayon de portée. Tout nœud capteur $\mathbf{N}_i \in \mathbf{Réseau\ de\ capteurs}$ procède au calcul de :

- Son degré \mathbf{Deg}_i en s'appuyant sur sa table de voisinage locale \mathbf{TL}_i .
- Son énergie résiduelle $\mathbf{E}_{res}(i)$.
- De la formule \mathbf{Val}_i .

Ci-dessous, le pseudo-algorithme associé (algorithme 2) .

Paramètres :

N_i : Noeud Capteur.

N_j : Noeud Capteur avec $N_j \neq N_i$.

TL_i : Table locale de voisinage du noeud N_i .

$E_{res}(i)$: Représente l'énergie résiduelle du noeud capteur N_i . Initialement E_{res} = Énergie de départ.

$E_{Rx}(i)$: Quantité d'énergie dissipée du noeud i afin d'effectuer une réception.

$E_{Tx}(i)$: Quantité d'énergie dissipée du noeud i afin d'effectuer une émission.

Deg_i : Représente le degré du noeud capteur N_i . Initialement $Deg_i = 0$.

HELLO : Message contenant l'identité ainsi que l'énergie résiduelle de son émetteur.

Nb_{ch} : Désigne le nombre de fois qu'un noeud i a été élu CH au cours des p derniers rounds.

Initialement $Nb_{ch} = 1$.

Délais : Temps nécessaire à la réception d'un nombre de messages égal au nombre de noeuds capteurs dans le réseau (pire des cas).

Algorithme 2: Phase de calculs de la formule d'élection.

Input : Réception de M_{init} , $E_{res}(i)$, Deg_i , **Délais**.

Output : Deg_i , TL_i , $E_{res}(i)$, calcul et diffusion de Val_i , diffusion des messages **HELLO**.

```

1  if (Réception de  $M_{init}$  par  $N_i$  depuis la SB) then
2     $E_{res}(i) \leftarrow E_{res}(i) - E_{Rx}(i)$ ;
3    Diffusion d'un message HELLO;
4     $E_{res}(i) \leftarrow E_{res}(i) - E_{Tx}(i)$ ;
5    Attente Délais;
6  end if
7  while ( Délais non dépassé) do
8    if (Réception d'un message HELLO provenant d'un noeud capteur  $N_j$ ) then
9       $E_{res}(i) \leftarrow E_{res}(i) - E_{Rx}(i)$ ;
10      $Deg_i \leftarrow Deg_i + 1$ ;
11     Ajouter une entrée pour  $N_j$  dans  $TL_i$ ;
12   end if
13 end while
14 for  $N_i = 1$  to  $Taille(TL_i)$  do
15    $Val_i = \left( \frac{Deg(i)}{N} * \frac{E_{res}(i)}{Nb_{CH}(i)} \right)$ ; (3.5)
16   Diffusion des valeurs  $Val_i$  et  $id_i$  aux  $N_j \in TL_i$ ;
17 end for

```

Chaque nœud N_i envoie la valeur Val_i ainsi calculée à ses voisins $N_j \in TL_i$. Ainsi, chaque nœud capteur connaît la valeur Val_i associée à chacun de ses voisins. Le nœud capteur possédant la plus grande valeur de Val_i est élu comme étant CH.

Dans le cas où deux nœuds capteurs N_i et N_j (ou plus) posséderaient une même valeur Val_i , le nœud possédant la plus grande identité selon un ordre numérique est élu CH. Tout nœud élu CH pour le round en cours diffuse son état aux reste des nœuds capteurs en utilisant la même énergie de transmission. Ci-dessous, le pseudo-algorithme associé (algorithme 3).

Paramètres :

Val_tab_i : Tableau qui va contenir les valeurs Val_j provenant de N_j avec $N_j \in TL_i$ ainsi que l'identifiant de la source.

Initialement la taille de **Val_tab_i** est égale à la taille du tableau **TL_i**.

Algorithme 3: Phase de sélection des Clusters-Heads.

Input : Val_j , TL_i , $Nb_{ch}(i)$, **CH** (booléen).

Output : $Nb_{ch}(i)$, Élection des CH's et diffusion du nouveau statut.

```

1  for ( $a = 1$  to  $Taille[TL_i]$ ) do
2      Recevoir  $Val_j$ ;
3      Ajouter une entrée pour  $N_j$  dans Val_tabi;
4  end for
5  CH  $\leftarrow$  faux;
6  for ( $a = 1$  to  $Taille[Val\_tab_i]$ ) do
7      if (Max_Val_tabi <  $Val_i$ ) then
8          CH  $\leftarrow$  vrai;
9      else if (Max_Val_tabi =  $Val_i$ ) then
10         if ( $id[Val_i] > id[Max\_Val\_tab_i]$ ) then
11             CH  $\leftarrow$  vrai;
12              $Nb_{ch}(i) \leftarrow Nb_{ch}(i) + 1$ ;
13         end if
14     else
15         CH( $i$ )  $\leftarrow$  faux
16     end
17 end for
18 if (CH = vrai) then
19     Diffusion de son nouveau statut aux  $N_j \in TL_i$  ;
20 end if

```

3.5.4 Étape 03 : Phase de formation des Clusters.

Après accomplissement des deux étapes 3.5.2 et 3.5.3, les simples nœuds capteurs décident pour le round courant du cluster auquel ils appartiendront en se basant sur le meilleur RSSI (*Received Signal Strength Indication*) qui est une mesure de la puissance et de la qualité en réception d'un signal dans un environnement sans fil. Ainsi il fournit une indication sur l'intensité du signal reçu [33]. En cas d'égalité, le CH possédant le plus grand identifiant selon un ordre numérique est choisi.

En se basant sur le nombre de nœuds dans leurs clusters respectifs, chaque CH procède à un ordonnancement TDMA [25] (*Time Division Multiple Access*) qui sera diffusé aux membres de son cluster, c'est un multiplexage temporel de la bande passante dont le but est de répartir le temps disponible entre les différents nœuds capteurs constituant son cluster. Par ce moyen, une porteuse d'onde peut être allouée à plusieurs nœuds, et chaque nœud capteur sera en mesure de savoir quand il pourra transmettre.

La taille des clusters créés ne doit pas excéder la taille optimale d'un cluster initialement décidée par la SB.

3.5.5 Étape 04 : Phase de transmission.

Une fois que la sélection des CHs et la création des clusters associés terminée, la transmission des données peut commencer.

Afin de minimiser les dissipations en énergie, la radio de tout nœud capteur non-CH peut être désactivée jusqu'à ce que le temps de transmission allouée au nœud arrive.

Ci-dessous (figure 3.4), le diagramme récapitulatif du fonctionnement de DHCEEP :

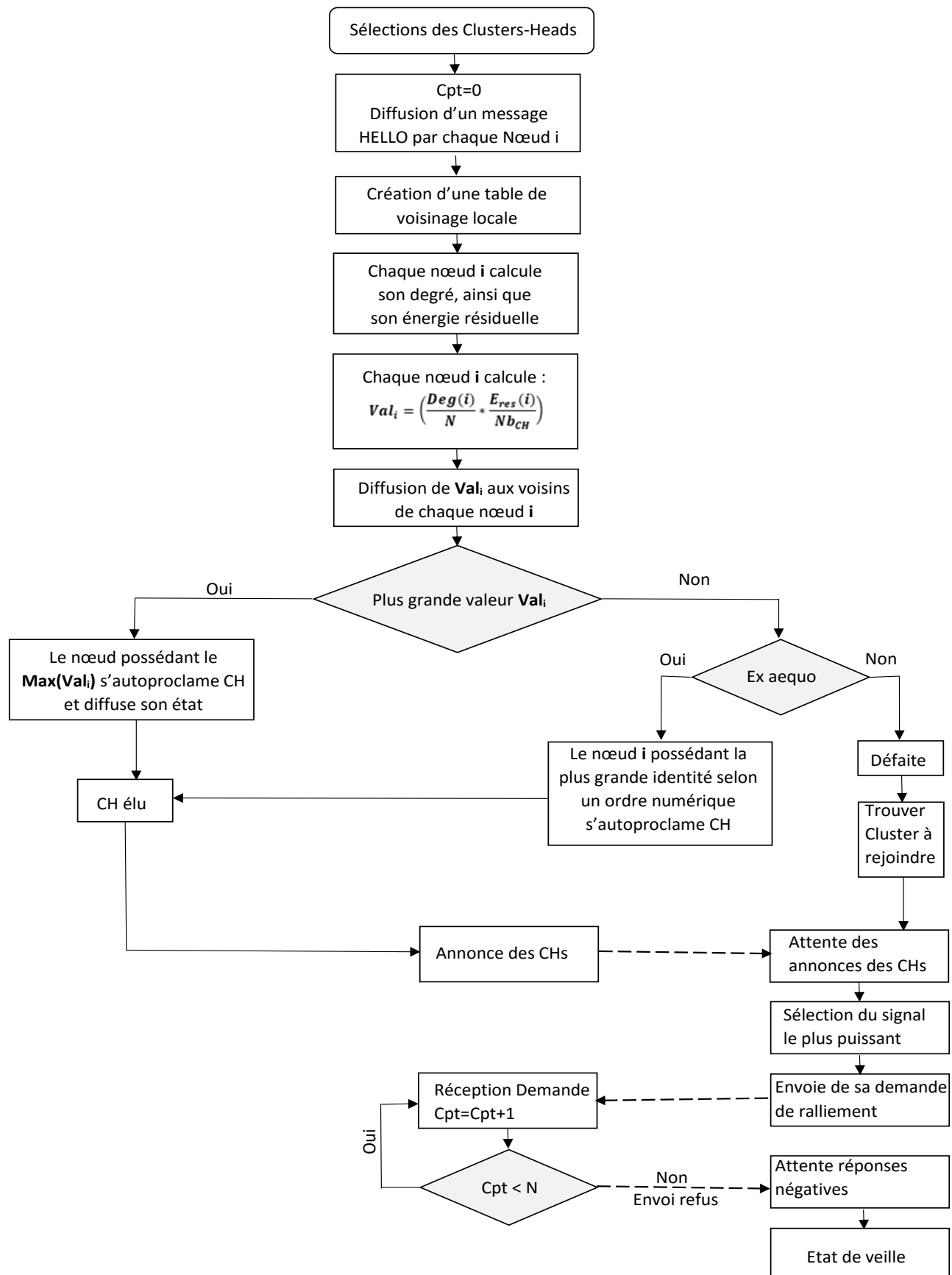


FIGURE 3.3 – Diagramme détaillant l'exécution du protocole DHCEEP.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil a été proposé. Ce protocole est basé sur une méthode déterministe de rotation des CHs.

Contrairement aux protocoles basés sur la clusterisation qui exigent généralement plus de ressources matérielles pour certains nœuds (comme les CHs), nous n'imposons pas cette contrainte pour l'utilisation de notre protocole de routage.

Dans le chapitre suivant, on évaluera le protocole DHCEEP précédemment proposé.

Simulation et analyse des résultats

4.1 Introduction

Dans ce présent chapitre nous allons comparer par la simulation le protocole proposé DH-CEEP aux deux protocoles LEACH [13] et TEEN [14]. On commencera par argumenter le choix du simulateur qui sera utilisé, puis on passera à la description du modèle radio de consommation d'énergie, puis suivra la description des étapes de la construction de la simulation. Finalement, on terminera par donner les résultats de la simulation ainsi que les paramètres associés avec une analyse des résultats obtenus en nous basant sur certains paramètres de performances, le tout clôturé par une conclusion.

4.2 Choix du simulateur

Il existe plusieurs simulateurs, parmi lesquels on retrouve :

- **NS-3** (*Network Simulator*) : NS-3 [34] est un simulateur réseau open source à événements discrets. Son noyau et ses modèles sont implémentés en C++, mais avec une interface de script Python. L'objectif de NS-3 est de développer un environnement de simulation ouvert pratique pour la recherche dans les réseaux. Les outils `nam`, `ns3-viz` associés au simulateur NS permettent la visualisation des animations issues de la simulation tel que le transfert et la taille des paquets échangés, l'état des files d'attente, etc... .
- **OMNeT++** : tout comme NS-3, OMNeT++ [35] est un simulateur réseau à événements discrets programmé en C++. Il peut être utilisé dans les deux types de réseaux filaires et sans fil.
- **AVRORA** : AVRORA [28] est un simulateur spécialement conçu pour les RCSFs sous Java. Il offre une vaste gamme d'outils qui peuvent être utilisés dans la simulation des RCSFs. Cependant, ce dernier n'offre pas d'interface graphique.

4.2.1 Choix de Matlab

Développé par la société The MathWorks, MATLAB [36] est optimisé pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique et programmation.

MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes. Ces fonctions peuvent être construites dans tout les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit.

La simulation du protocole proposé requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices. Le côté évaluation des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB.

Dans la simulation on utilisera la version R2014b (8.4.0.150421) de MATLAB.

4.3 Modèle de consommation d'énergie

Le Choix du modèle radio est essentiel car les hypothèses sur les caractéristiques radio, y compris la dissipation d'énergie due à l'émission ou à la réception auront un impact direct sur la performance d'un protocole de routage. De ce fait, le modèle radio de consommation d'énergie introduit par W. Heinzelman et al. dans [13] est repris dans l'élaboration de la simulation de ce protocole.

La figure 4.1 suivante illustre ce modèle de consommation d'énergie :

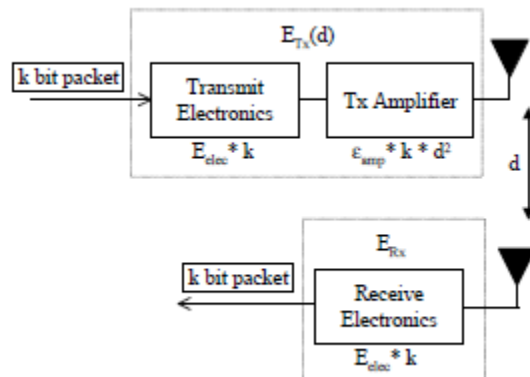


FIGURE 4.1 – Modèle radio introduit par W. Heinzelman et al. [13].

- Pour émettre un message de k bits vers un récepteur loin de d mètres, l'émetteur radio ET_x consomme :

$$ET_x(k, d) = ET_{x_{elec}}(k) + ET_{x_{amp}}(k, d) \quad (4.1)$$

$$ET_x(k, d) = (E_{elec} * k) + (E_{amp} * k * d^2) \quad (4.2)$$

E_{elec} et E_{amp} représentent respectivement l'énergie dissipée pour faire fonctionner le circuit électronique de l'émetteur ou du récepteur (avec $ET_{x_{elec}} = ER_{x_{elec}} = E_{elec}$) et l'énergie d'amplification.

- Pour recevoir un message de k bits, le récepteur radio ER_x consomme :

$$ER_x(k) = ER_{x_{elec}}(k) \quad (4.3)$$

$$ER_x(k) = E_{elec} * k \quad (4.4)$$

- Lorsque le CH reçoit des données en provenance des membres de son cluster, ce dernier procède à leur agrégation afin de produire un seul signal à émettre vers la SB. Lors de cette opération, la quantité d'énergie consommée est équivalente à $EAg(nergied'agrgation)$ (voir le tableau ??).

4.4 Étapes de la simulation

4.4.1 Déploiement des nœuds capteurs

A titre d'exemple, 100 nœuds capteurs sont aléatoirement déployés sur une zone d'intérêt de $100m^2$ de surface. La SB est positionnée aux coordonnées (0m, 0m). Initialement, il n'y a pas de CH, alors les nœuds sont tous de type normal (voir figure 4.2).

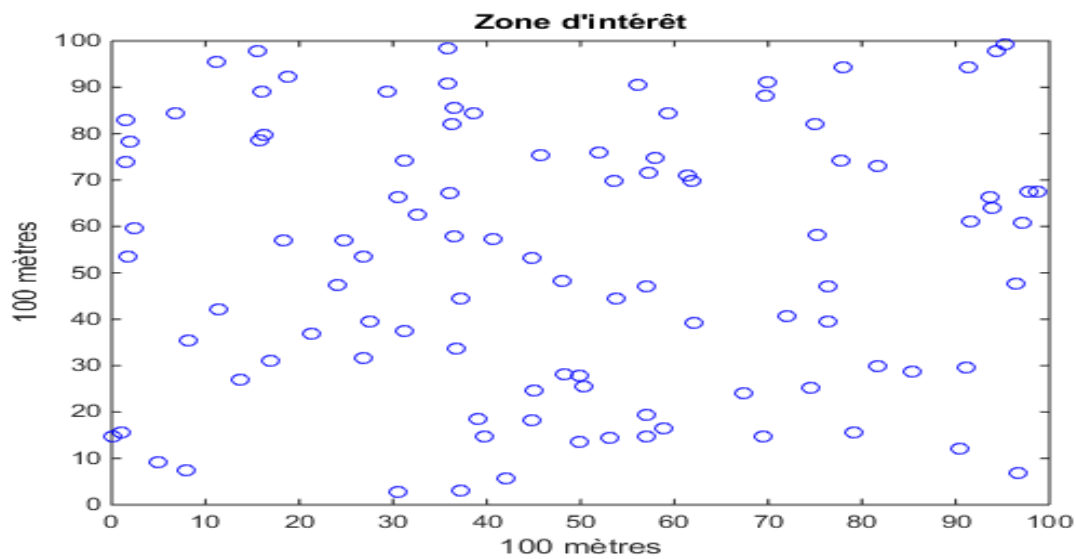


FIGURE 4.2 – Déploiement aléatoire de 100 nœuds capteurs.

4.4.2 Création d'une table de voisinage locale et calcul du degré de chaque nœud capteur

Afin de déterminer dans la simulation les voisins de chaque nœud capteur, la distance entre deux points (A,B) sur un plan cartésien est calculée (équation 4.5), puis elle est comparée au rayon de portée **R** précédemment défini. Ce résultat est sauvegardé dans une matrice.

$$Distance(A,B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (4.5)$$

- Si $Distance(A,B) < R$ alors B est à portée de A, $B \in \text{Voisins}(A)$ et $Matrice(A, B)=1$.
- Si $Distance(A,B) > R$ alors B n'est pas à portée de A, $B \notin \text{Voisins}(A)$ et $Matrice(A, B)=0$.

Ci-dessous (figure 4.3), la portion de code associée :

```
for i=1:1:n
    for j = 1:1:n
        distance = sqrt((N(i).xd - N(j).xd)^2 + (N(i).yd - N(j).yd)^2);
        if distance <= R
            matrice(i, j) = 1;
        else
            matrice(i, j) = 0;
        end
    end
end
end
```

FIGURE 4.3 – Création de la table de voisinage.

Le calcul du degré d'un nœud capteur A, ayant par exemple un identifiant qui est égale à 1, se fera en sommant la ligne de la Matrice précédemment introduite portant pour indice l'identifiant de A, ainsi la somme moins un donne le degré. Ci-dessous (figure 4.4), la portion de code associée :

```
for i=1:1:n
    N(i).deg=sum(matrice(i,:))-1;
end
```

FIGURE 4.4 – Calcul du degré de chaque nœud capteur.

4.4.3 Sélection des CHs et Création des clusters

Pour chaque nœud non-CH, quelques calculs et tests sont réalisés pour identifier le CH le plus proche et les nœuds qui doivent être mis en veille.

Les résultats ainsi obtenu sont illustrés par la figure 4.5 ci-dessous :

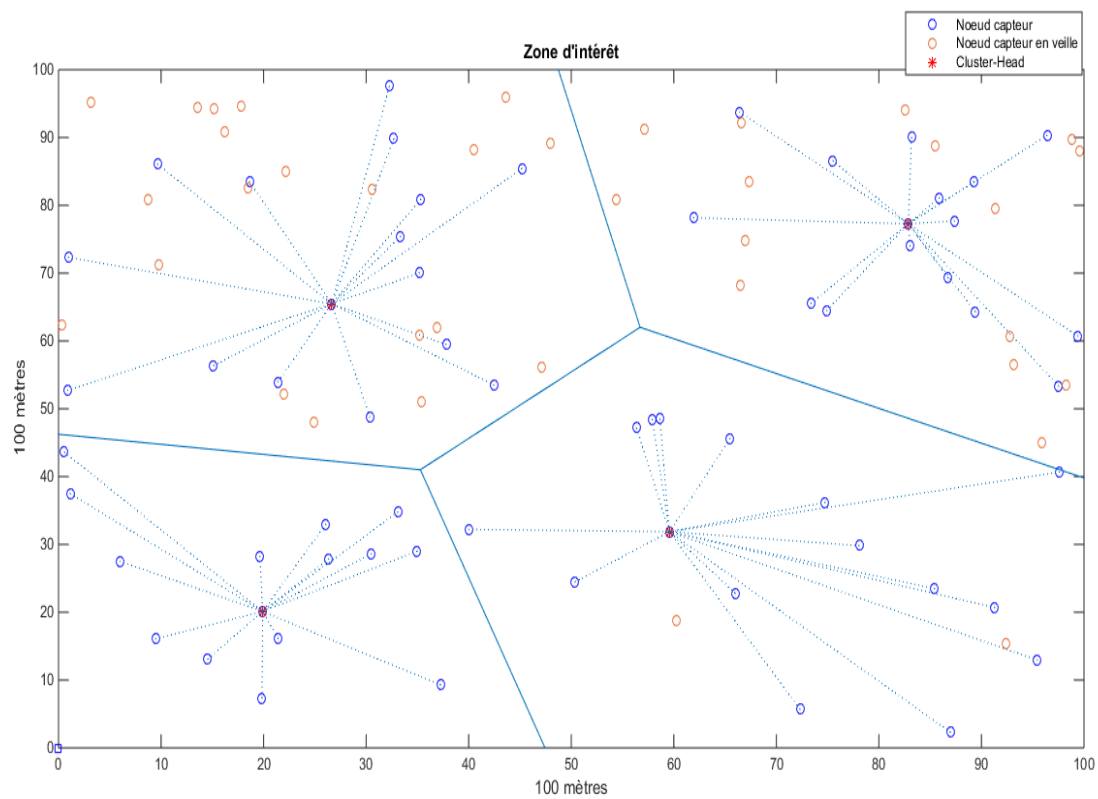


FIGURE 4.5 – Élection des CH et création des clusters associés.

4.5 Affichage des résultats de la simulation

4.5.1 Paramètres de la simulation

Le tableau suivant (table 4.1) résume les valeurs utilisées pour différents paramètres :

Paramètre	Valeur	Unité de mesure
Position de la SB	(0,0)	mètres
Nombre de nœuds capteurs	100	-
Énergie initiale	0.2	Joules
DHCEEP		
Rayon de portée des capteurs	20	mètres
Taille des clusters	5, 13	-
Taille d'un message HELLO	7	Bits
Taille d'un message Vali	7	Bits
LEACH		
Probabilité optimale de l'élection des CHs	0.05	-
TEEN		
Probabilité optimale de l'élection des CHs	0.05	-
Hard Threshold	100	
Soft Threshold	2	
Caractéristiques radio		
E_{elec} (énergie consommée par le circuit électronique)	50	nJ/bit
E_{amp} (énergie d'amplification)	100	pJ/bit/m ²
E_{Ag} (énergie d'agrégation)	5	nJ
Longueur des paquets	2000	bits
Rayon de portée	20	mètres

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

Dans le but d'observer l'impact de la taille des clusters dans DHCEEP, deux simulations avec deux configurations différentes seront effectuées :

-Dans la première : Nous paramétrons la taille optimale des clusters **Toc=5** avec l'exécution de 2000 itérations.

-Dans la deuxième : Nous ajustons la taille des clusters vers une valeur plus élevée **Toc=13** avec l'exécution de 4500 itérations.

Les caractéristiques radio ont été définies en s'appuyant sur le modèle énergétique de W. Heinzelman et al. [13].

L'énergie initiale de chaque nœud capteur est paramétrée à $E_0 = 0.2$ Joules. Avec cette énergie de départ, et en utilisant les paramètres décrits dans la table ??, un CH peut procéder à l'envoi d'approximativement ≈ 1052 messages. Un simple nœud capteur est en mesure d'effectuer ≈ 1110

envois de messages et les deux peuvent effectuer jusqu'à ≈ 2000 réceptions. Un nœud capteur peut atteindre une moyenne de ≈ 1384 opérations mixtes.

4.5.2 Résultats de la simulation

Le déploiement étant de type aléatoire, il peut être plus au moins différent d'un protocole à un autre, pouvant donner ou pas l'avantage à l'un des protocoles.

Dans le but d'éviter cela et d'obtenir des résultats et des comparaisons plus pointues, 10 simulations de chacun des trois protocoles DHCEEP, LEACH et TEEN seront effectuées. Pour chaque protocole, les résultats ainsi obtenus seront stockés dans une table Excel, la moyenne des 10 résultats sera extraite, puis elle sera représentée graphiquement.

Ci-dessous, les résultats des tests réalisés sur les trois algorithmes de DHCEEP, LEACH et TEEN sont présentés, dont le but est de comparer les performances du protocole proposé.

Trois métriques sont utilisées pour évaluer la performance du protocole proposé DHCEEP : la période de stabilité, la durée de vie du réseau et l'énergie moyenne restante.

4.5.2.1 Période de stabilité

Nous définissons la période de stabilité comme étant l'intervalle de temps entre le démarrage du protocole et la mort du premier nœud capteur dans le réseau.

a. Première configuration

N° simulation	Tours		
	DHCEEP	TEEN	LEACH
Simulation 01	423	19	24
Simulation 02	513	10	7
Simulation 03	448	8	6
Simulation 04	414	30	15
Simulation 05	497	11	2
Simulation 06	402	12	2
Simulation 07	464	31	26
Simulation 08	403	17	34
Simulation 09	380	23	2
Simulation 10	530	17	8
Moyenne	447.4	17.8	12.6

TABLE 4.2 – Mort du premier nœud capteur (configuration 1).

D'après les résultats obtenus et illustrés dans la table 4.2, dans LEACH, la mort du premier nœud survient en moyenne aux alentours du 13^{ème} round. TEEN atteint en moyenne 18 tours. DHCEEP surpasse les deux scores, il permet de maintenir la totalité du réseau en vie pendant 447 rounds soit 435 tours de plus que LEACH et 430 tours de plus que TEEN.

On constate clairement l'ascendant du protocole proposé. En effet, DHCEEP multiplie en moyenne par 26 la durée de la période de stabilité par rapport à TEEN et par 37 celle de LEACH.

b. Deuxième configuration

N° simulation	Tours		
	DHCEEP	TEEN	LEACH
Simulation 01	178	25	7
Simulation 02	169	25	3
Simulation 03	135	24	22
Simulation 04	158	4	13
Simulation 05	147	3	5
Simulation 06	145	29	21
Simulation 07	170	20	18
Simulation 08	153	5	8
Simulation 09	179	38	3
Simulation 10	0	9	7
Moyenne	143.4	18.2	10.7

TABLE 4.3 – Mort du premier nœud capteur (configuration 2).

La table 4.3, nous permet de remarquer que DHCEEP permet d'améliorer la période de stabilité d'un facteur de 8 par rapport à TEEN et d'un facteur de 14 par rapport à LEACH.

La comparaison des deux tables 4.2 et 4.3 nous montre que la deuxième configuration accélère la mort du premier nœud dans le RCSF tout en gardant l'ascendant de DHCEEP.

4.5.2.2 Durée de vie du réseau

a. Première configuration

Dans le but d'évaluer la durée de vie du RCSF, 2000 itérations (rounds ou tours) sont exécutées. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés par la figure 4.6 ci-dessous :

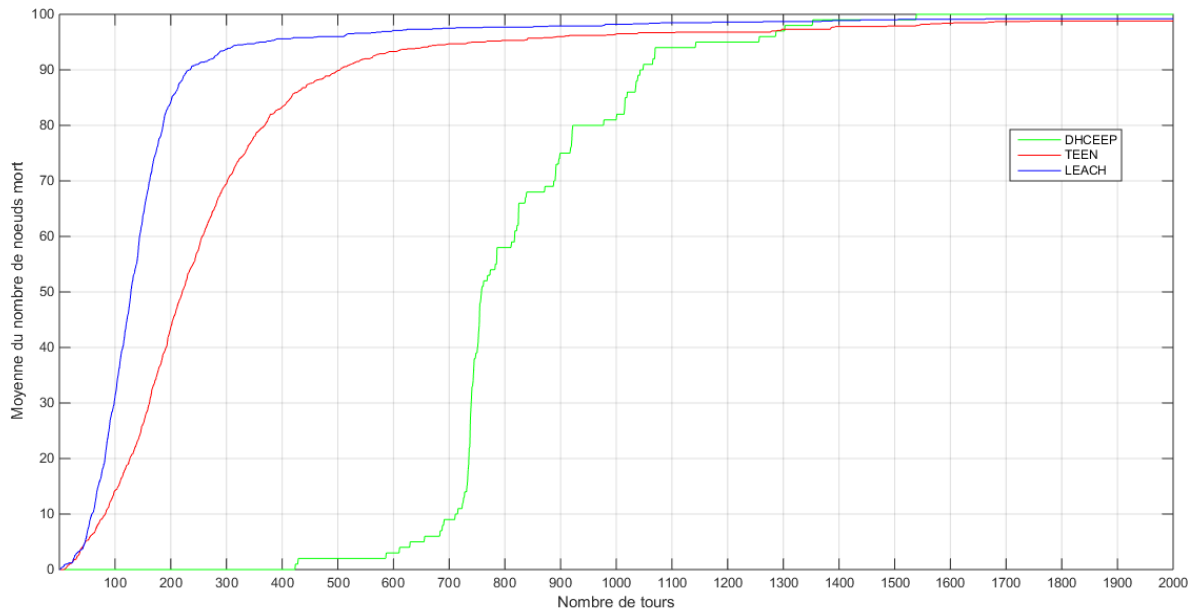


FIGURE 4.6 – Moyenne du nombre de nœuds morts en fonction des tours (configuration 1).

TEEN et LEACH exécutent en moyenne les 447 premiers tours avec au final respectivement 12.6% et 4.2% de la totalité du RCSF en vie. En moyenne DHCEEP, pour le même nombre de tours exécutés permet de sauvegarder la totalité (100%) du réseau en état de fonctionnement.

Au-delà des 447 tours, dans DHCEEP, les nœuds capteurs commencent progressivement à devenir défectueux (panne d'énergie). Ainsi, après 758 tours, 50% des nœuds capteurs demeurent fonctionnels avec DHCEEP contre 2.4% pour LEACH et 5% pour TEEN.

Après avoir atteint le seuil des 98.8% des nœuds en panne, Les trois protocoles (DHCEEP, TEEN, LEACH) comparés atteignent en moyenne approximativement dans l'ordre 1353, 1805 et 1370 tours. Il est à noter que TEEN fait mieux que DHCEEP et LEACH en exécutant plus de tours, mais avec la quasi-totalité du réseau de capteurs en panne d'énergie.

b. Deuxième configuration

Toujours dans le but d'évaluer la durée de vie du RCSF, 4500 itérations (rounds ou tours) sont exécutées. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés par la figure 4.7 ci-dessous :

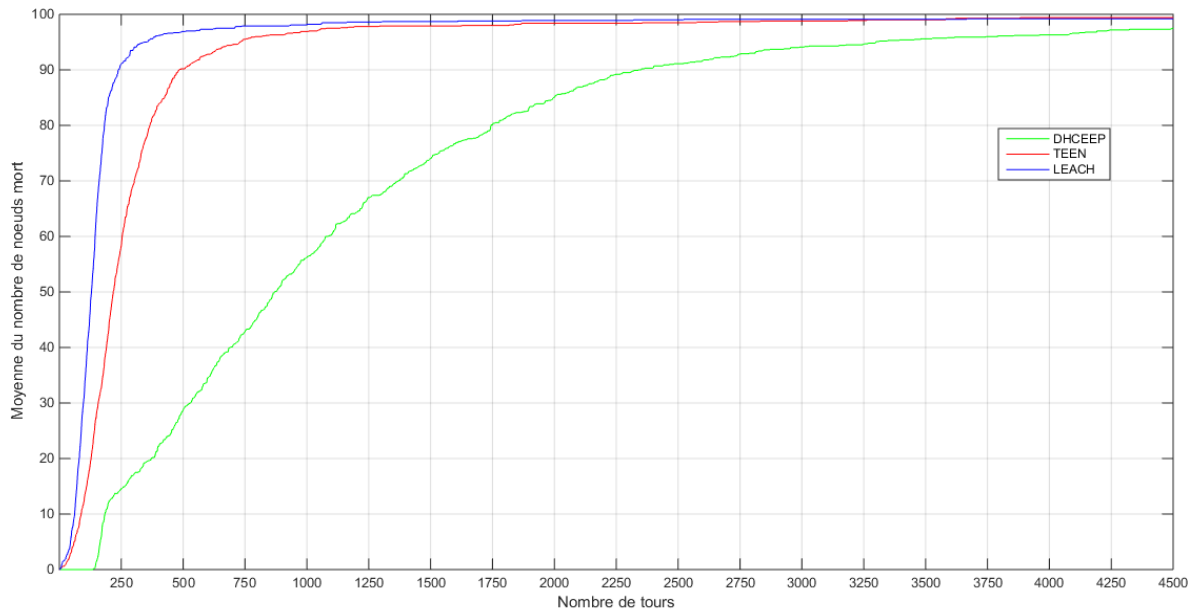


FIGURE 4.7 – Moyenne du nombre de nœuds morts en fonction des tours (configuration 2).

DHCEEP exécute en moyenne 144 tours avec 100% du RCSF en état de marche. Contre 18 et 10 tours pour TEEN et LEACH (dans l'ordre).

DHCEEP atteint les 870 tours avec 50% du RCSF en état de fonctionnement, TEEN et LEACH les atteignent avec respectivement 96% et 98% du RCSF non fonctionnel. C'est à dire avec seulement 4% et 2% du RCSF fonctionnel.

Au seuil des 4500 tours, le RCSF atteint les limites de sa durée de vie avec 99.2% des nœuds capteurs non fonctionnels pour TEEN et LEACH et 97.7% des nœuds capteurs non fonctionnels pour DHCEEP.

La comparaison des deux figures 4.6 et 4.7, nous montre que la première configuration permet de prolonger la période de stabilité de DHCEEP avec une moyenne de 304 rounds par rapport à la deuxième configuration. La deuxième configuration quand à elle permet de prolonger la durée de vie du RCSF dans DHCEEP d'approximativement 2800 tours.

On constate effectivement comme le laissait supposer l'hypothèse en section 3.3, que DHCEEP permet de maximiser la durée de vie globale du réseau par rapport à LEACH et TEEN, ainsi il permet d'exécuter plus de tours tout en gardant une plus grande partie du réseau en état de fonctionnement.

4.5.2.3 L'énergie moyenne restante

Ci-dessous (figure 4.8 et figure 4.9), les trois protocoles DHCEEP, TEEN et LEACH sont comparés par rapport à la moyenne d'énergie des nœuds capteurs du réseau lors de chaque tour exécuté.

a. Première configuration

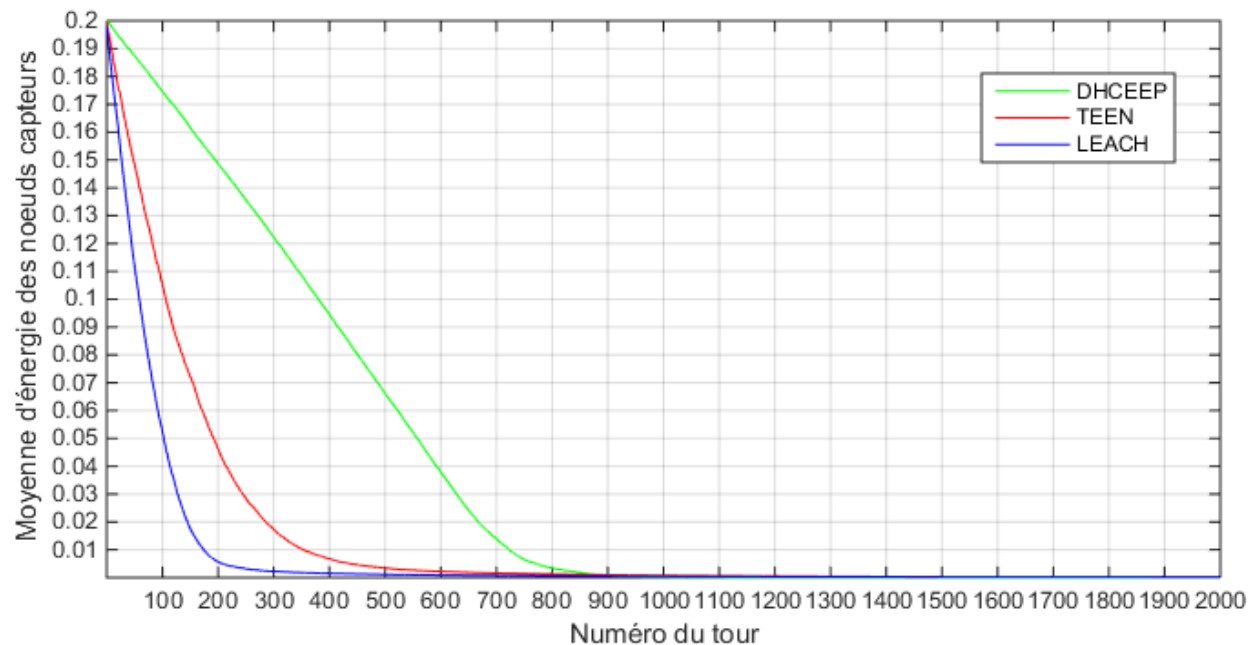


FIGURE 4.8 – Moyenne d'énergie des nœuds capteurs par tour (configuration 1).

On remarque que la moyenne d'énergie des nœuds capteurs dans DHCEEP a tendance à diminuer beaucoup plus lentement que dans TEEN et LEACH. En effet, DHCEEP atteint une moyenne d'énergie de 0.1 Joule après 380 tours achevés. TEEN et LEACH épuisent beaucoup plus rapidement l'énergie du RCSF avec respectivement 105 et 58 tours achevés avant d'atteindre la même quantité d'énergie moyenne, soit respectivement 275 et 322 tours de moins que DHCEEP. On peut sans doute attribuer ce résultat à la meilleure répartition des charges de DHCEEP sur l'ensemble du RCSF.

b. Deuxième configuration

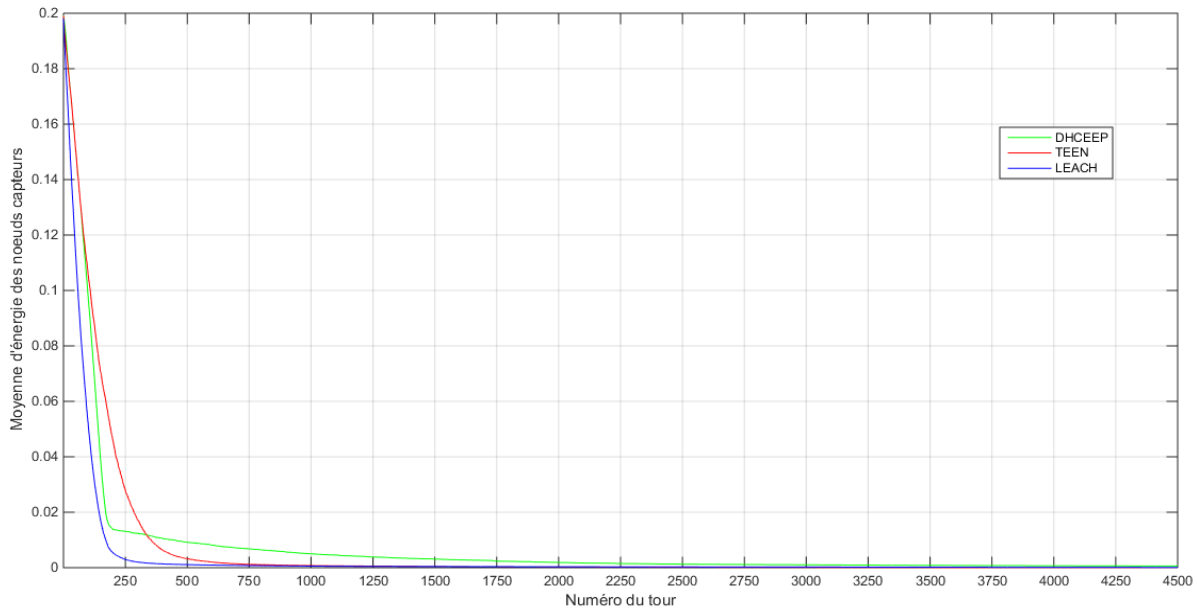


FIGURE 4.9 – Moyenne d'énergie des nœuds capteurs par tour (configuration 2).

On remarque tout d'abord, qu'à partir du 69^{ème} tour, une décroissance plus accentuée de la moyenne d'énergie dans DHCEEP par rapport à TEEN. Ensuite nous observons une stabilisation de la moyenne d'énergie dans DHCEEP, elle passe ainsi au-dessus de celle de TEEN aux alentours du 329^{ème} tour, alors que la courbe associée à TEEN continue sa décroissance. Enfin on peut voir que DHCEEP permet de conserver une moyenne d'énergie plus élevée pendant les 4171 tours qui suivent le début de la stabilisation.

La comparaison des deux figures 4.8 et 4.9 nous permet de conclure qu'une plus petite taille des clusters (configuration 01) permet une meilleure conservation globale d'énergie dans le RCSF.

4.6 Conclusion

Un protocole déterministe à répartition de charge des tâches a été proposé, il optimise la sélection de CH. Cet algorithme considère entre autres les facteurs d'énergie résiduelle et d'uniformité de taille des clusters. Il aide à la sélection optimale des CHs. Comme le prouve le résultat de la simulation, l'apport de l'algorithme peut améliorer efficacement la consommation d'énergie du réseau.

Conclusion et perspectives

Nous avons proposé un protocole purement déterministe appelé DHCEEP qui offre une meilleure utilisation de la ressource énergétique. Les résultats de ce présent travail montrent clairement que DHCEEP surpasse LEACH et TEEN. En effet il permet d'allonger la durée de la période de stabilité et de vie du RCSF en fonction de la taille des clusters choisie.

Nos principales contributions sont les suivantes :

- DHCEEP a prolongé la durée de vie globale du réseau en attribuant le rôle de Cluster-Head aux nœuds capteurs les plus capables.
- CHs uniformément distribués.
- L'élection des CHs est décidé localement en se basant sur l'énergie résiduelle (E_{res}), le degré (**Deg**), et le nombre de fois ayant été CH (Nb_{CH}) de chaque nœud capteur ainsi que la taille optimale des clusters (**Toc**).
- DHCEEP permet également à l'utilisateur de contrôler la taille des clusters en fonction de l'application visée.
- Meilleures performances que LEACH et TEEN.

Toutefois, cet effort ne peut être considéré que comme un début pour un travail plus profond qui aurait comme objectif une optimisation plus poussée pour augmenter la durée de vie des RCSFs, leurs efficacités et leurs rentabilités. Ainsi, quelques avenues de recherche se dessinent à la suite de ce présent travail :

- Tout comme LEACH et TEEN, DHCEEP utilise un routage à un saut, où chaque nœud capteur peut transmettre directement aux CHs, et chaque CH peut communiquer directement avec la SB. Par conséquent, il n'est pas approprié aux réseaux déployés dans de larges régions car cela pourrait diminuer le gain en consommation d'énergie. Afin de remédier à cela, et puisque nous disposons déjà des table de voisinages locales, il serait intéressant de réaliser comme prochain objectif une combinaison du protocole proposé et d'un routage multi-sauts, et de prêter une plus grande attention à la complexité de l'algorithme.

- La répétition du processus de clusterisation à chaque round peut créer une surcharge et une grande déperdition en terme d'énergie. Il serait intéressant de déclencher la formation de clusters seulement lorsque le niveau d'énergie résiduelle des CHs associés tombe en dessous d'un certain seuil. Ceci permettrait une plus grande efficacité énergétique.

- Approfondir et multiplier les simulations en essayant différentes tailles de clusters, des zones d'intérêt de plus grande dimension et différents nombres de nœuds capteurs.

Bibliographie

- [1] A. Campbell. *The science and engineering of microelectronic fabrication*. Oxford University Press, 2001.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12) : pages 2292–2330, 2008.
- [3] I. F Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4) : pages 393–422, 2002.
- [4] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine*, 19(2) : pages 40–50, 2002.
- [5] K. Pawar and Y. Kelkar. A survey of hierarchical routing protocols in wireless sensor network. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 1(5) : pages 50–54, 2012.
- [6] S. Rana, A. N. Bahar, N. Islam, and J. Islam. Fuzzy based energy efficient multiple cluster head selection routing protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 7(4) : page 54, 2015.
- [7] A. Braman and G. Umapathi. A comparative study on advances in leach routing protocol for wireless sensor networks : A survey. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(2) : pages 5683–5690, 2014.
- [8] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *Wireless Communications*, 11(6) : pages 6–28, 2004.
- [9] D. Bhattacharyya, T. Kim, and S. Pal. A comparative study of wireless sensor networks and their routing protocols. *Sensors*, 10(12) : pages 10506–10523, 2010.
- [10] K. S. Jasmine and B. Naidu. A new sensor network protocol stack architecture for congestion control. *Computer Science Series*, 10(1) : pages 94–98, 2012.
- [11] P. Kaur and M. Katiyar. The energy-efficient hierarchical routing protocols for wsn a review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(11) : pages 194–199, 2012.
- [12] A. Al-Rahayfeh, M. Almiani, and A. Abuzneid. Parameterized affect of transmission-range on lost of network connectivity (Inc) of wireless sensor networks. *International Journal of Wireless and Mobile Networks*, 2(3) : pages 63–79, 2010.

- [13] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii International Conference*, page 10, 2000.
- [14] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Teen : a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 30189a–30189a, 2001.
- [15] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. Apteen : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In *16th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, page 0195b, 2002.
- [16] T. Murata and H. Ishibuchi. Performance evaluation of genetic algorithms for flowshop scheduling problems. In *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pages 812–817, 1994.
- [17] V. Chandrasekaran. A review on hierarchical cluster based routing in wireless sensor networks. *Journal of Global Research in Computer Science*, 3(2) : pages 12–16, 2012.
- [18] S. Lindsey and C. S. Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Aerospace conference proceedings*, pages 3–6, 2002.
- [19] M. Zelkowitz. *Advances in Computers : Architectural Advances*, volume 69. Elsevier Science, 37Academic Press, New York, 8 2011.
- [20] X. Liu. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensors*, 12(8) : pages 11113–11153, 2012.
- [21] G Rashed, H. Kabir, M. S. Rahim, S. Enayet, and al. Cluster based hierarchical routing protocol for wireless sensor network. *International Journal of Computer and Network Security*, 2(5) : pages 128–131, 2010.
- [22] M. G. Rashed, M. H. Kabir, M. S. Rahim, S. Ullah, and al. Cbhrp : A cluster based routing protocol for wireless sensor network. *Computer Science and Engineering*, 1(3) : page 11, 2012.
- [23] N. Javaid, S. Mohammad, K. Latif, U. Qasim, Z. Ali Khan, and M. A. Khan. Heer : hybrid energy efficient reactive protocol for wireless sensor networks. In *Electronics Communications and Photonics Conference*, pages 1–4, 2013.
- [24] P. Rajeshwari, B. Shanthini, and M. Prince. Hierarchical energy efficient clustering algorithm for wsn. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 23(6) : pages 108–117, 2015.
- [25] TDMA. <http://www.futura-sciences.com/magazines/high-tech/infos/dico/d/informatique-tdma-1115/>. Consulté le : 07-06-2016.

- [26] S. K. Sinigh, M. P. Sinigh, and D. K. Sinigh. Routing protocols in wireless sensor networks – a survey. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, 1(2) : pages 63–83, 2010.
- [27] S. Rani and T. Gulati. An improved pegasis protocol to enhance energy utilization in wireless sensor network. *International Journal of Computing and Corporate Research*, 2(3) : pages 147–253, 2012.
- [28] Avrora. <http://compilers.cs.ucla.edu/avrora/>. Consulté le : 21-05-2016.
- [29] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*.
- [30] H. Dhawan and S. Waraich. A comparative study on leach routing protocol and its variants in wireless sensor networks : a survey. *International Journal of Computer Applications*, 95(8) : pages 21–27, 2014.
- [31] Y. Wang and M. Xiong. Monte carlo simulation of leach protocol for wireless sensor networks. In *Sixth International Conference on Parallel and Distributed Computing Applications and Technologies*, pages pages 85–88, 2005.
- [32] L. Chung-Horng and Z. Chenjuan. Using hierarchical agglomerative clustering in wireless sensor networks : An energy-efficient and flexible approach. *Ad Hoc Networks*.
- [33] Understanding RSSI. <http://metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>. Consulté le : 07-06-2016.
- [34] Ns-3. <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>. Consulté le : 21-05-2016.
- [35] Omnet++. <https://omnetpp.org/>. Consulté le : 21-05-2016.
- [36] Matlab. <http://fr.mathworks.com/products/matlab/>. Consulté le : 21-05-2016.
- [37] K. Akkaya and M. Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 3(3) : pages 325–349, 2005.
- [38] S. Waware, N. Sarwade, and P. Gangurde. A review of power efficient hierarchical routing protocols in wireless sensor networks. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(2) : pages 1096–1102, 2012.
- [39] L. Dehni, Y. Bennani, and F. Krief. *LEA2C : Une nouvelle approche de routage dans les réseaux de capteurs pour l’optimisation de la consommation d’énergie*. PhD thesis, Université de Paris 13, Paris, 2003.
- [40] O. Younis and S. Fahmy. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks : A hybrid, energy-efficient approach. In *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 1, 2004.

- [41] L. Qing, Q. Zhu, and M. Wang. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 29(12) : pages 2230–2237, 2006.
- [42] S. Sharma and M. Rani. An improvement for heer protocol in wireless sensor network. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(3) : pages 3399–3402, 2014.
- [43] T. Singh, N. Gupta, and J. Minj. Hierarchical cluster based routing protocol with high throughput for wireless sensor networks. In *Signal Processing, Computing and Control, IEEE International Conference on*, pages pages 1–6, 2013.
- [44] G. He. Destination-sequenced distance vector protocol. In *Networking Laboratory*, pages 1–9, 2002.

RÉSUMÉ

L'émergence des réseaux de capteurs sans fil a ouvert la voie au développement de nouveaux protocoles de routage toujours plus performant les uns que les autres. Mais principalement en raison de la taille miniaturisée des capteurs sans fil, plusieurs limitations surgissent (contrainte d'énergie, capacité réduite des nœuds, etc). Ces limitations motivent une grande partie des problématiques de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, en particulier la contrainte d'énergie qui est un problème fondamental.

Dans ce contexte, en plus de la contrainte énergétique, on s'intéressera à une autre problématique, que sont les lacunes de certains protocoles qui utilisent une stratégie de sélection et de rotation aléatoire des CHs : la mauvaise distribution des CHs constitue un inconvénient de base.

Dans ce document, on a mis l'accent sur l'élaboration d'une nouvelle formule déterministe d'élection des CHs et de construction de clusters de taille plus ou moins constante dans le but est la mise en place d'un protocole de routage hiérarchique déterministe qui solutionne fortement les exigences nécessaires à la résolution des lacunes des protocoles de routage hiérarchique probabilistes.

Mots clés : Réseau de capteurs sans fil, routage, formule d'élection, aléatoire, déterministe, simulation, Matlab.

ABSTRACT

The emergence of wireless sensor networks has led the way in developing new ever more efficient routing protocols. But mainly because of the miniaturized wireless sensor size, several limitations arise (constrained energy, reduced capacity of the nodes, etc.). These limitations motivate a large part of the research problems in the field of wireless sensors networks , especially the constraint of energy which is a fundamental problem.

In this context, in addition to the energy constraint, we focused on another issue, that are the shortcomings of some protocols that use a random strategy in the selection and rotation of CHs : the bad distribution of CHs is a basic disadvantage.

In this document, we focused on the development of a new deterministic formula for the election of the CHs and construction of clusters with more or less constant size. The goal is the establishment of a hierarchical deterministic routing protocol which strongly solves the requirements for resolving the gaps of probabilistic hierarchical routing protocols.

Key words : Wireless sensor networks, routing, election formula, random, deterministic, simulation, Matlab.