

Université Paris 8

Laboratoire d'Informatique Avancée de Saint-Denis
LIASD - EA4383
2, rue de la Liberté - 93526 Saint-Denis cedex
France

Thèse de doctorat 3^{ème} cycle

Spécialité Informatique

Approches de routage adaptatif pour l'optimisation de la consommation énergétique dans les applications type RCSF

Présentée par M^{lle} Hania AOUDIA

Le 10 décembre 2015

Devant le jury composé de :

Mr. Alexandre CAMINADA	Professeur UTBM (Rapporteur)
Mme Lynda MOKDAD	Professeur UPEC (Rapporteur)
Mme Nicole LEVY	Professeur CNAM (Examineur)
Mme Jacqueline SIGNORINI	Professeur Université Paris-8 (Examineur)
Mr Laurent MOUNIER	MCF Université Joseph Fourier Grenoble (Examineur)
Mr Boubaker DAACHI	Professeur Université Paris-8 (Examineur)
Mr Arab ALI-CHERIF	Professeur Université Paris-8 (Directeur de thèse)
Mr Youcef TOUATI	MCF Université-Paris-8 (Co-directeur de thèse)

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction	4
Chapitre 2 : Optimisation de l'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil	8
2.1 Introduction	8
2.2 Consommation d'énergie dans les RCSF	11
2.3 Techniques d'optimisation de la consommation d'énergie dans les RCSF	13
1. Techniques basées sur la partition du temps en cycles fonctionnels	14
2. Techniques orientées données	17
3. Techniques basées sur la mobilité des nœuds capteurs	18
2.4 Analyse et conclusion	21
Chapitre 3 : Mécanismes de routage d'informations pour la gestion d'énergie dans les RCSF	23
3.1 Challenges et enjeux dans les RCSF	24
3.2 Taxonomie des mécanismes de routage dans les RCSF	25
1. Routage basé sur la structure et la topologie du réseau	26
1.1 Routage centré données	26
1.2 Routage hiérarchique	31
1.3 Routage basé sur la localisation	38
2. Routage basé sur le fonctionnement du protocole	41
2.1 Routage multi-chemins	41
2.2 Routage par requêtes	42
2.3 Routage basé sur la négociation	42
2.4 Routage basé sur la QoS	43
2.5 Routage basé sur la cohérence des données	44
3.3 Analyse critique	44
3.4 Conclusion	46
Chapitre 4 : Mécanisme adaptatif pour le routage d'informations dans les RCSF hiérarchisés	48
4.1 Introduction	48
4.2 Mécanisme de routage adaptatif HHRP	51
1. Structure et topologie du réseau	52
2. Modèle énergétique	54
4.3 Description du mécanisme de clusterisation et de routage	55
1. Déploiement et initialisation du réseau	55
2. Construction et clusterisation de l'architecture du WSN	58
2.1 Diffusion des statuts	58

2.2 Attribution des slots	60
3. Transmission et traitement des données	61
3.1 Optimisation des chemins CH-SB	62
3.2 Sélection des CHs au niveau des Clusters	67
4.4 Evaluation des performances	73
1. Plateforme de travail	74
2. Résultats obtenus	74
4.5 Analyse critique et conclusion	80
Chapitre 5 : Routage hiérarchique hybride à base d'une clusterisation dynamique du réseau	82
5.1 Introduction	82
5.2 Mécanisme de routage HRP-DCM	83
1. Reconnaissance du voisinage	83
2. Phase de clusterisation	84
3. Attribution des slots	85
4. Phase de communication	85
5.3 Mise en œuvre et analyse des résultats	90
5.4 Conclusion	96
Chapitre 6 : Conclusion et perspectives	97
Bibliographie	100
Annexes	111
Annexes A : Routines NesC pour l'implémentation du protocole HHRP	112
Annexes B : Plateforme d'acquisition et d'exploitation des données capteurs	117
Glossaire	119
Liste des figures	121
Liste des tableaux	124
Publications personnelles	125

Chapitre 1

Introduction

Les avancées technologiques liées à la miniaturisation et à l'intégration des composants électroniques et à la programmation informatique ont opéré des changements drastiques dans le domaine des réseaux sans fil donnant naissance à une nouvelle génération de capteurs de petite taille pouvant fonctionner de manière autonome et interagir selon des protocoles de communication bien établis, c'est le cas des réseaux de capteurs sans fil RCSF. Ces capteurs disposent de fonctionnalités semblables à celles d'un ordinateur classique avec des composants type microcontrôleur, transducteur/actionneur, émetteur/récepteur radio généralement à portée limitée, le tout fonctionnant autour d'un OS dédié.

Les domaines d'application sont multiples [1-2] et peuvent concerner la détection et la surveillance environnemental, la gestion des transports, le contrôle de trafic et d'espaces intelligents, la maintenance industrielle, la santé, la domotique, le militaire, le spatial, ...etc. Dans des applications santé par exemple, l'utilisation d'un RCSF peut améliorer la qualité des soins par surveillance et monitoring à domicile de patients. Cela permet d'établir rapidement de la part du personnel médical des diagnostics et donc de prévoir en conséquence le type d'interventions à apporter. On peut citer aussi une classe de RCSF évoluée, i.e., WBAN¹ ou réseaux corporels, très utilisée dans le domaine e-santé, où la récolte de données se fait par implantation de micro-capteurs sur des parties ciblées du corps humain, i.e., électrocardiogramme, électroencéphalogramme, ...etc.

Un RCSF peut être déployé de manière précise dans des environnements structurés ou aléatoire dans des milieux hostiles ce qui le rend vulnérables à de multiples pannes allant de la défaillance physique causée par des facteurs environnementaux jusqu'à l'absence de ressources énergétiques dues à l'épuisement du dispositif batterie. Une intervention humaine est généralement difficile ou quasi-impossible à effectuer en raison de l'emplacement des capteurs. De ce fait, la gestion de la consommation énergétique devient une question incontournable dans la conception et la mise en œuvre d'un RCSF. Garantir un fonctionnement efficace avec un accroissement de la longévité du réseau en se limitant uniquement à une solution matérielle reste insuffisant. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres solutions logicielles qui permettraient de maîtriser l'exploitation de l'information dès sa source jusqu'à son acheminement vers sa destination en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des capteurs, i.e., faibles capacités de stockage et de puissance de calcul, et des contraintes énergétiques associées. Répondre en partie à ces besoins, passe par le développement d'outils informatiques et de stratégies protocolaires en modes basse consommation mettant en œuvre des mécanismes basés sur des techniques de routage d'informations. Les travaux développés dans cette thèse rentrent dans ce cadre d'étude.

¹ Wireless Body Area Networks.

Pour ce faire, nous proposons deux approches protocolaires que nous comparons avec d'autres mécanismes de routage LEACH² et TEEN³. La première approche HHRP⁴ utilise un mécanisme de routage adaptatif mettant en œuvre un modèle énergétique non linéaire afin d'apporter des améliorations tant au niveau de la consommation d'énergie qu'au niveau délais des traitements et d'acheminement des données. Le mécanisme utilise le concept de communication Fils-Parent et sélectionne les meilleurs chemins pour atteindre la destination finale par minimisation d'une fonction de performance par rapport à des paramètres critiques tels que les distances source-cible, la puissance du signal et la consommation d'énergie.

Lors de la phase de reconnaissance du voisinage, HHRP utilise la puissance des signaux radio RSSI⁵ pour estimer les distances entre nœuds capteurs. Or, dans les RCSF, les liaisons de communication sont asymétriques et étant donné que la puissance des signaux radio se mesure à la réception, cela peut engendrer des dégradations des performances du mécanisme de routage proposé et des erreurs d'estimation des valeurs RSSI. Ces dernières ne sont exploitables pour la localisation de nœuds qu'au bout d'un certain temps vu que la stabilité du signal n'est garantie que tardivement. Ainsi, le temps alloué pour la phase de reconnaissance devient important, accélérant de ce fait la consommation d'énergie et donc minimise la durée de vie du réseau. Pour y remédier, nous proposons une alternative en mettant en œuvre une approche de routage hybride HRP-DCM⁶ basée sur un mécanisme de clusterisation dynamique, permettant d'apporter des modifications non seulement sur la phase de reconnaissance du réseau mais aussi sur l'optimisation des chemins lors de la phase de communication.

Les résultats obtenus à partir d'une plateforme expérimentale mettant en œuvre un RCSF composé de nœuds capteurs type MICA2, montrent bien que les deux solutions protocolaires proposées présentent de meilleures performances comparativement aux protocoles LEACH et TEEN. Ainsi, comme l'illustre la figure 1.1, pour un RCSF à 50 nœuds capteurs, le réseau commence à perdre ses premiers nœuds au bout du premier et second round respectivement lors de l'implémentation des protocoles LEACH et TEEN. Les deux solutions proposées HHRP et HRP-DCM quand à elles, les premiers nœuds disparaissent qu'au bout de 5 rounds.

Si l'on considère que les performances d'un RCSF ne peuvent être assurées après la perte de 50% de l'ensemble des nœuds qui le composent alors on pourra conclure que la longévité du réseau est augmenté pour atteindre 28 et 31 rounds pour HHRP et HRP-DCM, contrairement à LEACH et TEEN qui n'atteint que 23 et 26 rounds respectivement.

² Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol

³ Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

⁴ Hybrid Hierarchical Routing Protocol

⁵ Received Signal Strength Indication

⁶ Hybrid Routing Protocol based on Dynamic clustering Method

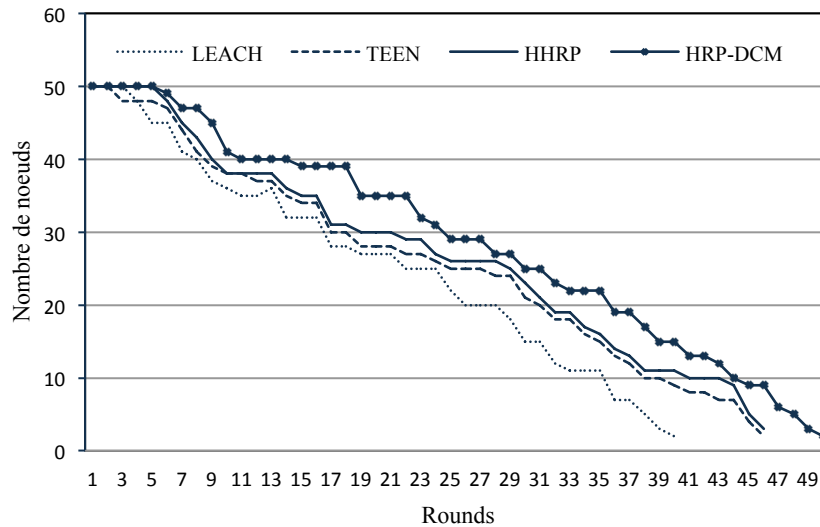


Figure 1.1 Evolution du réseau dans le temps

Les résultats du tableau 1.1 attestent de cela. L'énergie totale consommée lors de l'implémentation des différents protocoles sur des temps d'exécution allant de 300 à 3600 secondes montrent bien que l'approche HRP-DCM optimise le fonctionnement du réseau d'un facteur gain moyen équivalent à 10%.

Temps d'exécution [s]	Energie totale consommée [Joule]			
	LEACH	TEEN	HHRP	HRP-DCM
300	1,0997	1,0006	0,9694	0,9017
600	2,3870	1,9403	1,2599	1,0579
1200	5,6396	4,0945	3,8692	3,0165
2400	7,4373	7,0467	6,0924	4,9201
3000	8,4678	8,0194	7,1961	6,282
3600	11,5937	10,1638	10,4981	8,8092

Tableau 1.1 Energie dissipée dans un réseau à 50 nœuds

L'analyse des résultats ci-dessus montre bien que l'approche HRP-DCM consomme moins d'énergie que les approches concurrentes et donc prolonge la durée de vie du RCSF. Le nombre de messages utiles contenant l'information effective délivrée par les nœuds capteurs attestent de cela puisqu'il est plus important dans le cas de HRP-DCM augmentant ainsi le trafic dans le réseau (Figure-1.2). Plus la densité du réseau est grande plus le trafic est important, et plus la longévité du réseau est prolongée plus le trafic s'accroît.

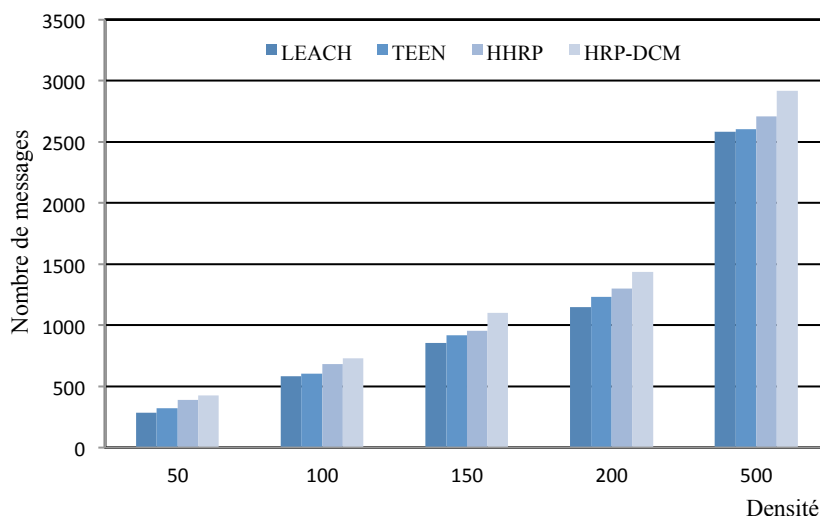


Figure 1.2 Trafic dans le réseau

Le plan de lecture du présent rapport de thèse est structuré comme suite :

Dans le deuxième chapitre, nous dressons un état de l'art sur les RCSF dans lequel nous présentons la structure et la composition d'un nœud capteur, l'architecture fonctionnelle d'un RCSF et les orientations en matière de l'amélioration de l'autonomie et de conservation d'énergie. Puis, nous exposons la taxonomie des différentes techniques d'optimisation de la consommation d'énergie suivie d'une partie analyse. Nous terminons en illustrant la problématique à traiter.

Dans le troisième chapitre, après avoir présenté les enjeux et challenges des applications RCSF et de la problématique à traiter, nous explorons l'ensemble des techniques de routage développées en mettant l'accent sur les facteurs améliorant ou dégradant les performances et le fonctionnement des réseaux. Nous concluons par une partie analyse afin de nous positionner sur la problématique soulevée dans notre travail de recherche qui fera l'objet du chapitre suivant.

Les chapitres quatre et cinq constituent nos contributions. Dans le quatrième chapitre, nous proposons une première solution de routage adaptatif HHRP mettant en œuvre un nouveau modèle énergétique non linéaire afin d'apporter des améliorations tant au niveau de la consommation d'énergie qu'au niveau délais des traitements et d'acheminement des données en se basant sur le concept de communication Fils-Parent.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons une seconde solution protocolaire HRP-DCM qui offre de meilleures performances que HHRP. Cette solution permet d'éviter les problèmes d'instabilité des données RSSI et les phénomènes d'asymétrie des liaisons de communication particulièrement lors de la phase de reconnaissance des voisins. L'évaluation des résultats obtenus sera réalisée sur la base d'une étude comparative avec les mécanismes de routage LEACH et TEEN.

Pour terminer, dans le sixième chapitre, nous concluons notre travail de thèse puis dressons quelques perspectives de recherche.

Chapitre 2

Optimisation de l'énergie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

Ces dernières années, l'évolution technologique des applications type réseaux de capteurs sans fil (RCSF) a suscité une curiosité importante et un intérêt grandissant à la fois du côté utilisateurs et fabricants mais aussi au sein de la communauté des chercheurs. Des défis importants ont été relevés pour assurer leur mise en œuvre en traitant des problématiques relevant du déploiement et de la connectivité, du routage et de sécurisation de l'information, mais beaucoup reste à faire au niveau de la gestion d'énergie. Un RCSF est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs, intégrant des dispositifs d'alimentation ou batteries, interconnectés via des liaisons radio assurant à la fois, la réception, le traitement et la transmission des données. L'un des objectifs principaux étant d'accroître l'autonomie des capteurs et de prolonger la durée de vie du réseau et pour ce faire il est intéressant d'étudier de prêt des méthodes qui permettent d'optimiser la consommation énergétique et de proposer des mécanismes pour y remédier. Les mécanismes peuvent concerner plusieurs niveaux d'intervention pouvant aller de la phase de déploiement à la phase d'exploitation de l'information.

Dans ce chapitre, nous dressons dans un premier temps un état de l'art sur les RCSF dont lequel nous présentons la structure et la composition d'un nœud capteur, l'architecture fonctionnel d'un RCSF et les orientations en matière de l'amélioration de l'autonomie et de conservation d'énergie. Dans un second temps, nous exposons la taxonomie des différentes techniques d'optimisation de la consommation d'énergie suivie d'une analyse critique des solutions existantes, puis nous mettons en avant la problématique à traiter dans ce travail de recherche.

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs¹ sans fil constituent une classe de réseaux ad hoc composés de nœuds capteurs mobiles et/ou statiques pouvant être déployés dans des environnements connus ou inconnus. Ces capteurs disposent d'une capacité énergétique leur permettant de fonctionner de manière autonome et intelligente, et de communiquer via des liaisons radio selon des mécanismes de routage établis préalablement [1-4].

Contrairement aux réseaux Adhoc qui se préoccupent plus à garantir une meilleure qualité de service en s'intéressant de plus près à la bande passante ou au délai de transmission [5-7], les RCSF favorisent plus l'optimisation des contraintes énergétiques étant donné qu'ils disposent de ressources très limitées

¹ Un capteur est un dispositif de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées (énergie, mémoire), autonome, capable d'acquérir, de traiter et de transmettre des informations via des ondes radio vers à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres.

dans le temps et quelques fois irremplaçable en termes d'énergie, de stockage des données et calculatoires, et cela via la mise en œuvre de mécanismes permettant de prolonger la durée de vie du réseau (Tableau 2.1).

En effet, un RCSF est constitué d'un nombre de nœuds plus ou moins importants, déployés dans un environnement opérationnel de manière précise ou aléatoire le plus souvent exposés aux pannes. Des pannes pouvant provenir d'un manque de ressources énergétiques (usure des batteries), de défaillances physiques provoquées par des facteurs environnementaux (pluies, vents, etc.) compliquant quelques fois les communications des données. Quand au facteur humain, souvent absent ne peut intervenir directement pour apporter des solutions (i.e., remplacement de batteries usées), ce qui n'est pas le cas dans les réseaux Adhoc où des nœuds mobiles sont intégrés pour remédier aux problèmes des pannes. Ainsi, il serait très intéressant de s'orienter vers l'exploitation et la mise en œuvre de stratégies de plus haut niveau telles que le routage et qui permettrait de pallier à ces problématiques de disfonctionnement.

Caractéristiques	RCSF	Réseaux Adhoc
Densité du réseau	Forte	Faible/Moyenne
Probabilité d'interférence	Grande	Faible/Moyenne
Partition de réseau	Possible	Peu probable
Ressources	Limitées	Acceptables
Type de communication	Diffusion	Point à point
Adressage	Localisation géographique	Adressage IP
Source d'énergie	Irremplaçable	Remplaçable
Redondance	Fort probable	Peu probable
Pannes	Très exposés	Peu exposés

Tableau 2.1 RCSF vs. Réseau Adhoc

Une forte densité de déploiement dans les RCSF favorise l'utilisation des communications multi-sauts impliquant d'une part, une faible consommation d'énergie et d'autre part, une prise en compte de problèmes liés à la propagation du signal fréquemment rencontrés dans les transmissions sans fil à longues distances. Actuellement, il existe des applications types RCSF nécessitant la mise en œuvre des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. L'objectif étant d'assurer à la fois une couverture suffisante du réseau et surtout permettre de remédier aux problèmes de pannes. Ainsi, la probabilité de l'existence d'un ou plusieurs nœuds voisins pouvant prendre le relais d'un nœud inopérant est très élevée. En d'autres termes, si les nœuds déployés aléatoirement dans un environnement donné sont réparties de façon uniforme, les risques de coupure ou de séparation du réseau sont moindres par rapport à un réseau Adhoc. Les problèmes d'interférences des communications et de redondance des données pouvant surgir peuvent-être gérés aussi.

D'une manière générale, un RCSF incorpore des capteurs communicants entre eux via des liaisons radios (Figure-2.1). Les informations issues suite à des événements extérieurs ou à la demande d'un utilisateur peuvent s'acheminer vers la destination à travers plusieurs chemins. L'objectif étant donc de trouver le meilleur chemin d'une source vers une destination, (i.e., Station de base), en optimisant des critères de performance tels que l'utilisation des ressources et/ou la qualité de service.

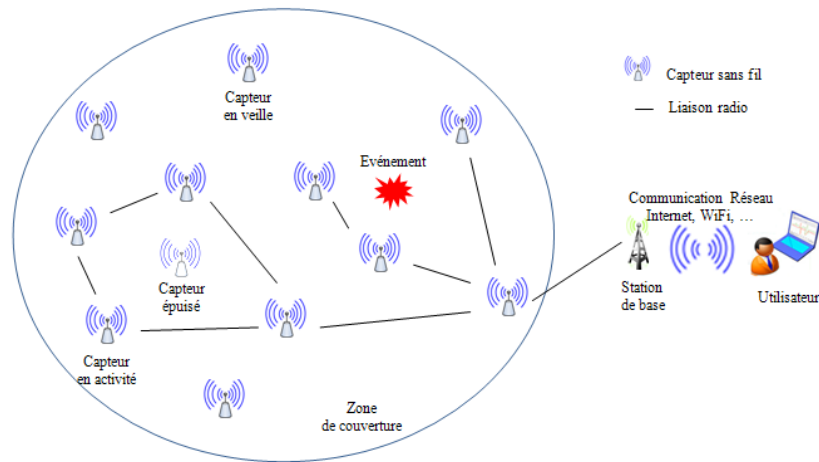


Figure 2.1 Vue globale d'un RCSF

Une gestion optimale de ces ressources est plus que nécessaire pour accroître la durée de vie du réseau [1-2][4]. La notion de durée de vie a été largement étudiée et possède plusieurs interprétations liées à l'état de fonctionnement du réseau. À titre d'exemples, un réseau peut être décrit comme inactif suite à plusieurs considérations, soit à la perte d'un premier nœud ou à l'épuisement de 50% de l'ensemble des nœuds, soit tout simplement à la disparition d'une zone de captage.

Les RCSF disposent d'une architecture fonctionnelle assurant l'interconnexion de plusieurs capteurs entre eux via un modèle OSI² établi par le standard ISO³ (Figure-2.2). Ce modèle permet de standardiser la communication entre les différentes couches via des protocoles associés [8-10].

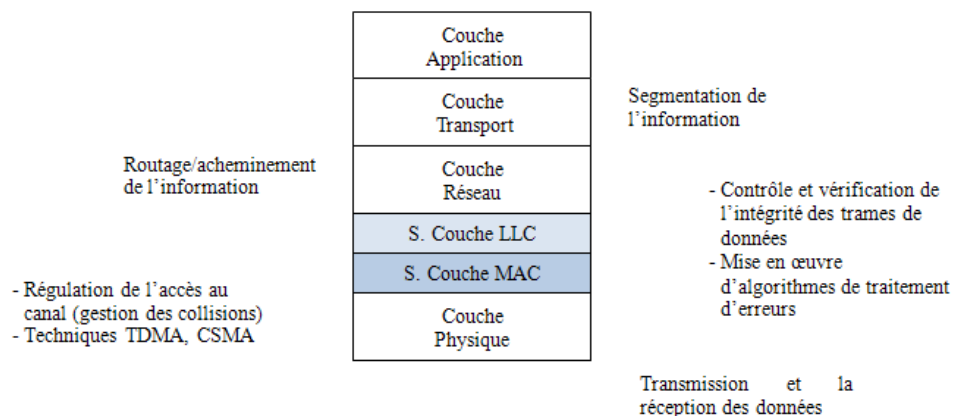


Figure 2.2 Pile protocolaire d'un modèle RCSF

Chaque couche intégrant son propre protocole et communique avec les autres couches adjacentes via son mécanisme d'échange d'information. Ainsi, la couche transport structure les informations issues de la couche application sous forme de segments pour les faire parvenir vers la couche réseau, en revanche, elle réordonne puis reconstitue les différents segments arrivant de la couche réseau pour les acheminer vers la couche application. La couche réseau spécifie les chemins pour les différents segments de données sous forme de trames via des mécanismes d'acheminement d'informations. Les sous-couches LLC et MAC constituent la couche liaison. La première permet le contrôle et la vérification de l'intégrité des trames de données reçues et transitant vers la couche physique en mettant en œuvre des algorithmes de traitement d'erreurs, i.e., CRC⁴. La sous-couche MAC s'occupe

² Open Systems Interconnection

³ International Standards Organization

⁴ Code Cyclique Redondant (Cyclical Redundancy Check)

principalement de la gestion des collisions, notamment via la mise en œuvre des stratégies de régulation d'accès au canal, et de mise en veille, en utilisant des techniques telles que le TDMA⁵ et CSMA⁶. La couche physique, elle assure la transmission et la réception des données.

Nombreux sont les protocoles qui opèrent à différents niveaux de la pile protocolaire, le choix et la mise en œuvre reste toute fois tributaire du contexte applicatif (i.e., environnement opérationnel et topologie du réseau) et de la problématique de pérennisation dans le temps l'activité du réseau (i.e. gestion de la consommation énergétique et optimisation des ressources). Mettre en œuvre un plan de gestion d'énergie est plus que nécessaire pour assurer le bon fonctionnement au niveau de chaque capteur particulièrement et de manière plus globale du réseau.

Dans ce qui suit, nous allons présenter et étudier la notion d'optimisation de la consommation d'énergie, nous exposerons la taxonomie des différentes techniques d'optimisation existantes puis nous mettrons en avant la problématique à traiter.

2.2 Consommation d'énergie dans les RCSF

L'optimisation de la consommation des ressources particulièrement énergétique dans les RCSF dépend non seulement de l'état opérationnel des capteurs mais aussi des techniques de routage et de sécurisation des données mises en œuvre [11-16]. Ainsi comme l'illustre la figure 2.3, le niveau opérationnel d'un capteur peut correspondre à plusieurs états de fonctionnement: capture, traitement, communication et veille.

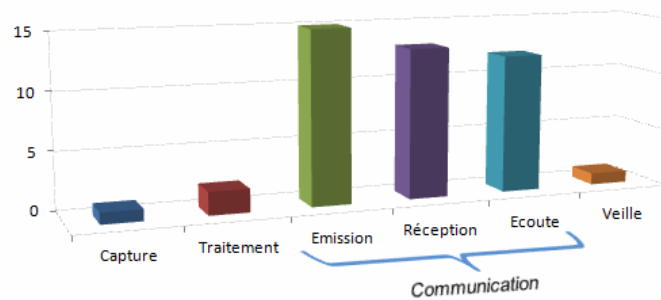


Figure 2.3 Niveaux de consommation d'énergie d'un capteur

La communication intègre à elle seule l'émission, la réception et l'écoute. C'est une phase dont laquelle un nœud capteur développe le plus de puissance pour l'acheminement des données. Plus les nœuds sont distants, plus l'énergie consommée est importante. En revanche, durant les phases de capture et de traitement, le capteur en dépense moins. Il en est de même pour la mise en veille où une tâche de fond est toujours en activité.

Jouant un rôle aussi important que l'aspect logiciel, l'architecture hardware d'un nœud capteur peut plus ou moins apporter des solutions particulièrement au niveau des traitements, de la capture et de la mise en veille [2][17-18]. Ainsi, on peut distinguer quatre unités principales (Figure-2.4) : Une unité de capture/mesure qui permet une acquisition de données réelles (température, humidité, pression, ...) sous forme de signaux analogiques, puis conditionnés et convertis en données exploitables. Quelques capteurs peuvent intégrer des cartes de traitement et d'exploitation des signaux type DSP⁷ pour des utilisations divers. L'énergie dépensée durant l'acquisition est due principalement au conditionnement et à la conversion des signaux.

⁵ Time Division Multiple Access

⁶ Carrier Sense Multiple Access

⁷ Digital Signal Processor

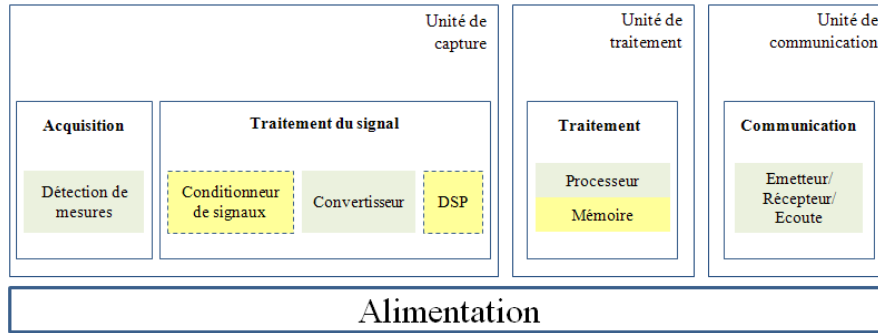


Figure 2.4 Architecture physique d'un capteur

Au niveau de l'unité de traitement, les données acquises seront exploitées par un processeur qui réalise des calculs tels que l'agrégation ou la synchronisation avec d'autres capteurs. Cette unité dispose d'une mémoire pour le stockage des données et de deux interfaces de communication avec les autres unités. Elle permet, grâce au système d'exploitation, (i.e., TinyOS⁸) de gérer l'ensemble des modules et de planifier les différentes tâches nécessaires pour l'acquisition et la transmission des données. L'énergie consommée par le processeur est certes plus importante que l'énergie consommée lors de l'acquisition des données mais à un degré moindre que celles consommées lors de communication. L'unité de communication assure, quand à elle, l'ensemble des émissions/réceptions radio usant de quantités d'énergie relativement importantes comparativement aux unités d'acquisition et de traitement (Figure-2.3). Dans Pottie et al. [9], il a été démontré que l'émission d'un seul bit via le module radio nécessite une énergie équivalente à celle de l'exécution de quelques milliers d'instructions d'un programme dans une unité de traitement.

Le module radio reste toujours un élément très gourmand en énergie malgré les efforts colossaux consentis ces dernières années dans les domaines de la micro et de la nanotechnologie. La mise en œuvre d'un tel module nécessite de prendre en compte et d'étudier les différents modes fonctionnels dans l'environnement opérationnel. On en distingue quatre modes: actif, récepteur, transmetteur et sommeil.

Le mode actif d'un nœud capteur correspond à l'activation de la radio sans pour autant transmettre ni recevoir des données engendrant ainsi une perte d'énergie additionnelle inutile. Afin d'éviter cela, le nœud capteur peut sommeiller en déconnectant sa radio, et le passage d'un mode sommeil à un mode actif nécessite le redémarrage de plusieurs softs et composants impliquant une consommation d'énergie plus importante que si un nœud capteur restait en mode actif. La gestion d'énergie peut être alors assurée par un protocole de la sous-couche MAC.

En modes émetteur/transmetteur, le nœud capteur transmet ou reçoit des messages sous forme d'octets, plus les messages sont grands, plus le nombre d'octets est important et plus l'énergie consommée devient conséquente. Pour y remédier, deux approches sont proposées [19-23] : La première permet d'éviter la transmission systématique des informations en passant par une sauvegarde. La transmission n'est activée qu'en cas de besoin ou de demande ce qui atténue la consommation d'énergie mais de la mémoire. La seconde approche utilise le principe d'agrégation des données par des traitements à base de fonctions mathématiques (somme, moyenne, maximum/minimum, filtrage, etc.) ou d'algorithmes pour optimiser le nombre d'octets à transmettre. Dans cette solution, la consommation d'énergie peut être optimisée sans pour autant disposer d'une puissance de traitement importante (Figure-2.5).

⁸ Système d'exploitation open-source pour les RCSF

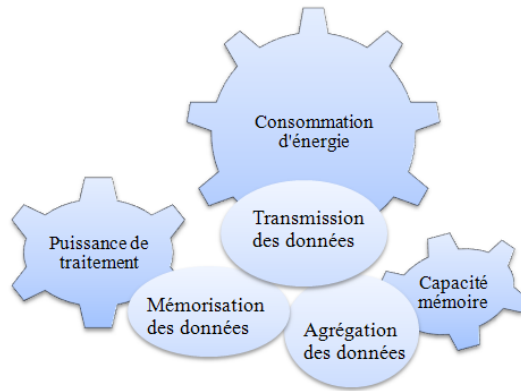


Figure 2.5 Répartition de la consommation des ressources

L'autonomie d'un capteur sans fil est gérée surtout par le module alimentation ou batterie qui fournit l'énergie nécessaire pour son fonctionnement (Figure-2.4). Le choix du type d'alimentation dépend des caractéristiques matérielles du capteur à déployer et du volume de traitements qu'il doit effectuer. Il est donc primordial d'estimer l'énergie nécessaire pour mettre en place une quelconque application vu que la durée de vie d'un capteur peut varier de quelques mois voir à une année sans intervention extérieure. S'orienter vers des sources d'énergie illimitées et naturelles telles que le solaire ou l'éolien s'avère très utile. Or, dans beaucoup de situations, l'environnement de déploiement est très contraignant pour l'utilisation de ces sources et peuvent être donc mal adaptées. A titre d'exemple, dans un environnement chaud et désertique, l'utilisation de panneaux solaires miniaturisés est très intéressant mais peuvent être moins efficaces dans des milieux désertiques sahariens vu les changements climatiques (tempête de sable) qui peuvent influencer et affecter directement et négativement leur fonctionnement. Actuellement, la solution la plus économique préconisée est une alimentation par piles standards de types lithium, alcaline ou NiMH⁹.

2.3 Techniques d'optimisation de la consommation d'énergie dans les RCSF

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été abordés pour étudier et traiter la problématique de la consommation d'énergie dans les RCSF. L'ensemble de ces travaux considère non seulement l'état opérationnel d'un capteur mais aussi plusieurs facteurs à savoir, la mobilité dans le réseau, le routage et la sécurisation de l'information, la qualité de service, etc. En s'appuyant sur le constat que la transmission radio nécessite plus d'énergie pour acheminer l'information d'une source vers une destination, il est intéressant d'entreprendre des recherches dans ce sens afin de concevoir et de développer de nouveaux mécanismes qui permettront d'apporter de meilleures solutions pour améliorer l'efficacité énergétique. En fonction du contexte, ces solutions peuvent être classées selon trois différentes techniques [19] (Figure-2.6):

- Gestion et partition du temps de fonctionnement.
- Données
- Mobilité des capteurs

⁹ Nickel-Metal Hydride (Accumulateur Nickel-Hydrure Métallique)

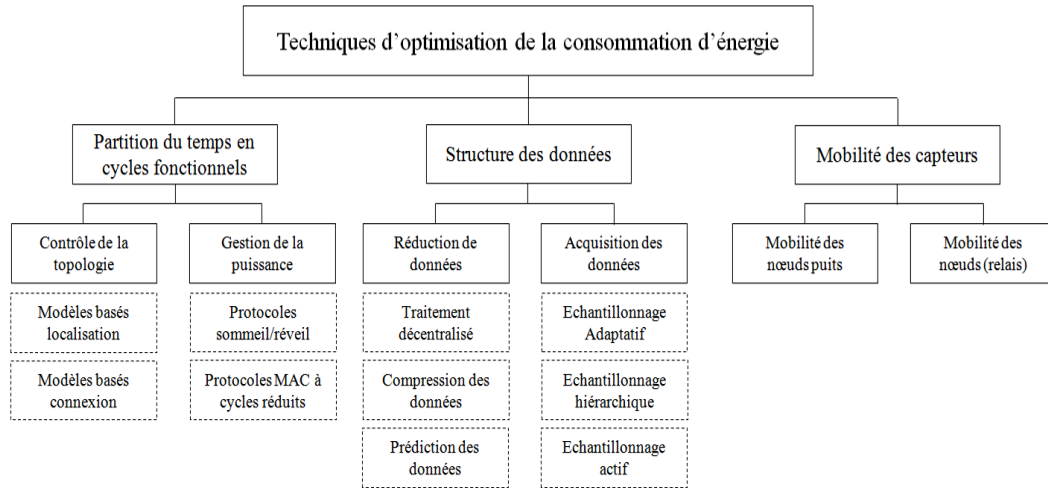


Figure 2.6 Taxonomie des techniques de consommation d'énergie

Le choix d'une technique au détriment d'une autre dépend du type d'application réseau à réaliser, des contraintes spatiales et/ou temporelles à satisfaire et globalement du contexte opérationnel.

1. Techniques basées sur la gestion et la partition du temps en cycles fonctionnels

Communément appelées *Duty-cycle techniques*, elles consistent à mettre en mode veille des nœuds capteurs lorsqu'aucune collaboration dans le réseau n'est requise afin d'optimiser au maximum l'énergie consommée. Idéalement, le système radio doit être éteint dès qu'il n'y a plus émission ou réception de données, et doit être activé dès que de nouveaux paquets de données sont disponibles, ainsi les nœuds alternent entre des périodes de réveil et de sommeil en fonction de l'activité dans le réseau. La partition du temps peut être réalisée selon deux approches différentes et complémentaires (Figure-2.7) : contrôle de la topologie et gestion de la consommation de la puissance. Il est possible d'exploiter la redondance des nœuds en sélectionnant de manière adaptative seulement un minimum de sous-ensemble de nœuds actifs pour assurer la connectivité. Les nœuds non sollicités peuvent passer en mode sommeil. Trouver le sous-ensemble optimal de nœuds devant garantir la connectivité relève du contrôle de la topologie. L'idée étant d'exploiter la redondance du réseau afin de prolonger sa durée de vie d'un facteur de 2 à 3 par rapport à un réseau exploitant la totalité de ses nœuds [24-26].

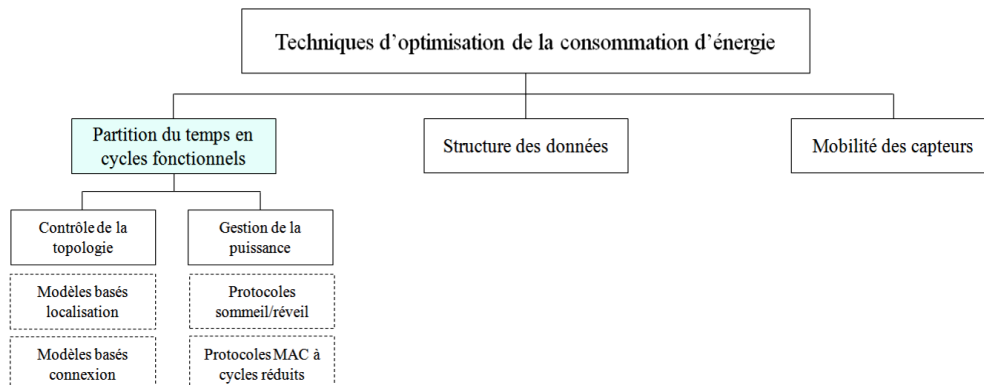


Figure 2.7 Taxonomie des techniques basées sur la partition du temps

Dans la classe de protocoles de *contrôle de la topologie*, les modèles orientés localisation déterminent l'ensemble des nœuds capteurs devant être activés ainsi que le temps d'activation en exploitant leurs positions. Celles-ci sont supposées être connues par utilisation par exemple de système de localisation

GPS¹⁰. Nous pouvons citer par exemple le protocole GAF¹¹ qui permet d'optimiser la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau acceptable sur la qualité de routage (perte de paquets, latence des messages) [28]. La zone de détection est divisée en petites grilles virtuelles adjacentes et équivalentes dont lesquelles un seul nœud, (i.e., leader), peut être activé à un instant bien précis. Cela passe par une coordination et une diffusion de messages sur l'ensemble des nœuds de chaque grille afin de sélectionner sur un intervalle de temps déterminé ceux devant être activés ou désactivés (mode sommeil). Périodiquement, le leader rediffuse un message de découverte permettant à d'autres nœuds de la grille d'être activés. Le réseau peut se retrouver sous-exploité dans sa totalité vu que le protocole se base sur la communication entre grilles adjacentes exploitant à moitié la portée radio. Un autre protocole GeRaF¹² qui exploite lui aussi la position des nœuds [29-31] permet de mettre dans un premier temps des nœuds capteurs en mode écoute puis évoluent périodiquement selon des cycles de fonctionnement alternant entre des phases de réveil et de sommeil. Dès qu'un nœud capteur souhaite transférer des données, il passe en mode réveil et diffuse un paquet contenant son propre emplacement et celui du destinataire. Ce dernier lui répond par un message d'acquittement afin d'enclencher la transmission. La zone proche du destinataire est divisée en régions avec chacune sa propre priorité. Plus la région est proche de la destination, plus sa priorité est élevée. Après diffusion des paquets, les régions dont les nœuds sont très proches de la destination sont sollicitées pour le transfert et le relaying de l'information. Si l'ensemble des nœuds d'une région sont en mode sommeil, une tentative de transit par une autre région dont la priorité est élevée, est effectuée, et ainsi de suite.

En revanche, les modèles orientés connectivité n'exploitent pas les informations géographiques des nœuds capteurs, mais activent et désactivent dynamiquement les nœuds capteurs en assurant à la fois la connectivité et la couverture du réseau [27]. On peut citer le protocole SPAN qui permet, à partir d'informations fournies lors du processus de routage sur les voisins et sur la connectivité, une élection dynamique de nœuds coordinateurs [33]. Ces derniers, en mode réveil, participent de manière active dans le processus de routage, alors que la majorité des nœuds est en mode veille. Afin de garantir un nombre suffisant de nœuds coordinateurs, SPAN utilise une règle d'éligibilité de nœud coordinateur. Si deux nœuds voisins d'un nœud non-coordonateur ne peuvent communiquer directement ou par l'intermédiaire d'un ou plusieurs nœuds coordinateurs, ce nœud devient coordinateur. Cependant, il peut exister des situations dans lesquelles plusieurs nœuds souhaitant assurer dans leur ensemble la coordination et dans ce cas, un délai d'attente est calculé aléatoirement pour chacun des nœuds afin de reporter leur annonce. Indépendamment du processus de routage, dans le protocole ASCENT¹³, un nœud peut décider de participer dans le processus de routage ou de sommeiller, sur la base d'informations liées à la densité, (i.e., connectivité) et à la perte de paquets suite à l'existence de collisions [34]. Initialement, le réseau considère seulement quelques nœuds actifs avec une majorité de nœuds passifs. Au fur et à mesure que le nombre de nœuds actifs augmente, la perte de messages entre la source et la destination (i.e. Puits) diminue. Si le nombre de nœuds actifs diminue, la destination sollicite les nœuds voisins, ces derniers étant en mode passif passent en mode actif en signalant alors leur présence à travers un message d'annonce. Ce processus se poursuit jusqu'à atteindre un taux de perte de message inférieur à un seuil puis se réinitialise suite à de nouveaux événements dans le réseau (ex. défaillance de nœud) ou à des changements dans le contexte environnemental.

Les techniques basées sur la *gestion de la puissance* se subdivisent en deux grandes catégories en fonction de l'architecture du réseau et du niveau de la couche protocolaire. On distingue des *protocoles MAC*¹⁴ à *cycles de fonctionnement réduits* et des *protocoles basés sur les modes sommeil/réveil*. Ces derniers, évoluant au-dessus de la couche MAC, (i.e., couche réseau ou application), permettent une

¹⁰ Global Positioning System. Le système GPS étant très coûteux à installer sur chaque nœud capteur, il ne peut concerner alors qu'un nombre limité. Cela est suffisant pour dériver le positionnement de l'ensemble des nœuds capteurs [27]

¹¹ Geographical Adaptive Fidelity

¹² Geographic Random Forwarding

¹³ Adaptive Self-Configuring sEnsenet Networks Topologies

¹⁴ Medium Access Control

grande flexibilité puisqu'ils peuvent être adaptés aux besoins de l'application et collaborer avec d'autres protocoles de la couche MAC. Ceux sont des protocoles indépendants des aspects topologiques et de la connectivité du réseau. Ils peuvent, à leur tour, être subdivisés en trois catégories principales de protocoles [35] : *à la demande*, *ordonnés* et *asynchrones*.

Les *protocoles à la demande* sont très efficaces car ils permettent de maximiser l'utilisation de l'énergie vu que les nœuds restent actifs uniquement pendant le laps de temps alloué à la communication. Le temps d'attente, (i.e., latence), pour réveiller un nœud cible étant très acceptable, en revanche, le processus de réveil est un peu compliqué. Une solution consiste à utiliser une *approche ordonnée* permettant de manière régulière et à l'avance de programmer des rendez-vous entre nœuds souhaitant communiquer. Les nœuds demeurent actifs pendant un intervalle de temps puis basculent en mode sommeil jusqu'au prochain rendez-vous. Ces protocoles sont très pratiques pour l'agrégation des données mais nécessitent des méthodes additionnelles de synchronisation des nœuds, processus difficilement réalisable et coûteux en termes de mise en œuvre. Les *protocoles asynchrones* ne nécessitent aucune synchronisation des nœuds. Les structures sont généralement très faciles à mettre en œuvre et peuvent assurer la connectivité même dans le cas des réseaux à dynamique importante. En revanche, le réveil est régulier nécessitant plusieurs cycles fonctionnels.

Les protocoles évoluant au niveau de la couche MAC optimisent les fonctions d'accès au canal en utilisant des cycles sommeil/réveil bien précis [36-39]. On peut citer trois méthodes : la méthode *TDMA*¹⁵, la *contention* et les méthodes *hybrides*.

Les méthodes *TDMA* [40] permettent un accès cyclique au canal. Les nœuds ne peuvent activer leur radio que pendant des créneaux bien précis, réduisant ainsi au strict minimum l'énergie consommée. Des clusters sont formés disposant chacun d'un nœud maître coordinateur comme par exemple dans LEACH¹⁶ [41], MAC-TDMA [42], Bluetooth [43], TRAMA¹⁷ et FLAMA¹⁸ [44-45].

Évoluant au niveau de la couche MAC, les méthodes par *contention* permettent un accès rapide au canal via des méthodes sommeil/réveil. On peut citer le protocole B-MAC¹⁹ [46] qui est fourni avec le système d'exploitation TinyOS [47] et qui offre des fonctionnalités de base avec un mécanisme d'accès au canal permettant une optimisation efficace de la consommation d'énergie. Un autre protocole S-MAC²⁰ basé sur un routage multi-sauts [48] dont lequel les nœuds échangent des paquets de synchronisation pour coordonner les cycles sommeil/réveil par rendez-vous. Les paramètres liés à la synchronisation sont constants et ne peuvent évoluer après déploiement du réseau. Pour prendre en charge ces changements, une version améliorée a été proposée : le protocole T-MAC²¹ [49]. D-MAC²² [50] est un protocole optimisé pour la collecte de données dont lequel les nœuds sont structurés en arbre parent-fils. Le temps de fonctionnement des nœuds est défini en fonction de leur position dans l'arbre. Chaque nœud dispose d'un intervalle de temps suffisant pour transmettre ses données. Il peut solliciter aussi son parent pour obtenir des slots supplémentaires adaptant ainsi les périodes actives de façon dynamique en fonction du trafic. Similaires aux approches par contention avec des niveaux de contention plus faibles, les *approches hybrides* utilisent des méthodes probabilistes TDMA [51] pour accéder au canal. En fonction de la contention existante, le protocole hybride peut switcher entre les modes CSMA et TDMA, d'où le terme : *hybride*. Afin d'être indépendant de tout phénomène lié soit à un changement de la topologie, soit aux erreurs de synchronisation et d'interférence, très réponsus dans les réseaux denses, ces approches se basent sur des communications à sauts uniques.

¹⁵ Time Division Multiple Access

¹⁶ Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

¹⁷ TRaffic-Adaptive Medium Access

¹⁸ Flow-Aware Medium Access

¹⁹ Berkeley MAC

²⁰ Sensor MAC

²¹ Timeout MAC

²² Dynamic MAC

2. Techniques orientées données

L'ensemble des techniques citées précédemment, sont insensibles aux données échantillonnées lors de la capture, or elles peuvent avoir un impacte important sur l'énergie consommée. Par conséquent, le recours à l'utilisation d'approches orientées données s'avère intéressant puisqu'elles sont en mesure d'apporter des solutions supplémentaires dans le contexte de l'accroissement de l'efficacité de l'optimisation énergétique.

Etant donné qu'une information échantillonnée dispose en général d'une forte corrélation spatiale et/ou temporelle dans le réseau [52], il n'est donc pas nécessaire par exemple, dans le cas d'un cluster donné, de communiquer des informations redondantes à la station de base, ce qui se traduit par un gain énergétique. Par ailleurs, ces techniques permettent de réduire la quantité des données échantillonnées tout en maintenant la précision des sous-systèmes de capture, particulièrement quand ces derniers sont à vide d'énergie.

Les *approches orientées données* (Figure-2.8) peuvent être classées en fonction de la problématique abordée. L'utilisation d'approches *de réduction de données* permet de traiter le cas d'échantillons inutiles, alors que les approches *d'acquisition de données* visent principalement à réduire l'énergie dépensée par les sous-systèmes de détection. Cependant, certaines d'entre elles peuvent aussi réduire la dépense énergétique, puisque c'est l'objectif principal.

Destinée pour des applications particulières, le *traitement décentralisé* [53] consiste à agréger des données par calcul par exemple de la moyenne de certaines valeurs au niveau de nœuds intermédiaires afin d'en réduire la dimension à transmettre. La *compression de données* peut être appliquée pour optimiser la quantité d'information émise par les nœuds sources. Cette technique permet respectivement l'encodage et le décodage de l'information au niveau des nœuds générant les données et le nœud puits. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes utilisant la compression [54-57], mais très peu d'entre-elles réfèrent à des applications type RCSF.

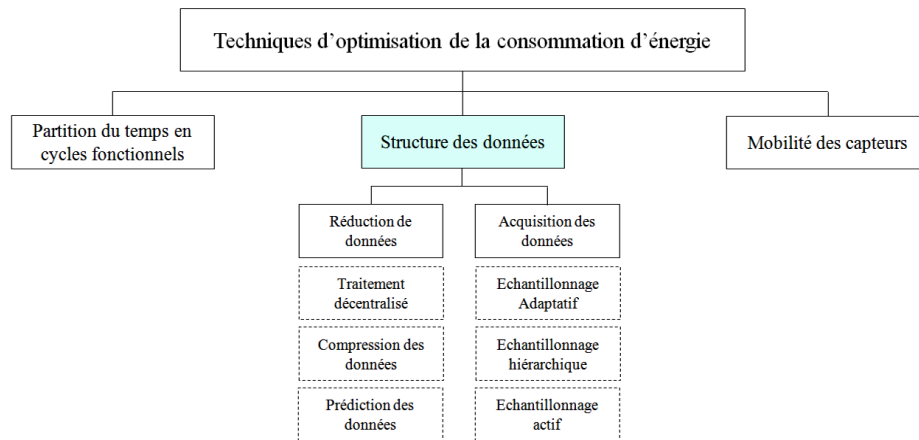


Figure 2.8 Taxonomie des techniques orientées données

La *prédiction des données* consiste à construire un modèle d'abstraction des phénomènes détectés afin de décrire l'évolution des données dans le temps. Le modèle ainsi obtenu peut prédire avec une erreur tolérable les données capturées. Si la précision de mesure est satisfaisante, alors les requêtes émises par les utilisateurs peuvent être évaluées au niveau du nœud puits via un modèle de prédiction sans pour autant nécessiter l'obtention de données exactes des autres nœuds. En revanche, si le modèle n'est pas suffisamment précis, alors une communication explicite entre les nœuds capteurs et le nœud puits est nécessaire, c'est à dire les échantillons réels doivent être récupérés en tant que tels et/ou le modèle doit être mis à jour. Ainsi, la quantité d'information transmise par les nœuds sources se retrouve réduite. On distingue trois classes principales. Les *approches stochastiques* qui caractérisent des phénomènes de manière stochastique, en termes de probabilité et de propriétés stochastiques [58-59]. Elles sont généralistes et permettent d'effectuer des opérations d'un niveau élevé telle que l'agrégation

mais avec des coûts de calcul élevés et lourds particulièrement lors de l'utilisation de dispositifs de captage simples et répandus dans les commerces. En revanche, elles semblent intéressantes pour les dispositifs de captage à puissances de calcul très élevées. Il est à noter que des améliorations peuvent toujours être apportées dans ce sens en mettant en œuvre des modèles distribués simples assurant un compromis calculs-précision. Contrairement aux approches stochastiques, la *prévision des séries temporelles* considère explicitement la structure interne des données pour prédire les futures valeurs [60][62]. Elles peuvent fournir une précision satisfaisante, même si des modèles simples type ARMA par exemple, sont utilisés. La mise en œuvre sur des dispositifs de captage semble être simple et légère. Les techniques les plus avancées [61] ne nécessitent pas une contribution de l'ensemble des données détectées tant qu'un modèle n'est pas disponible. Ils permettent de détecter des valeurs aberrantes et les incohérences liées au modèle. Une phase d'adaptation est plus qu'importante pour représenter le phénomène étudié. Une direction intéressante consiste à adopter une approche multi-modèle comme celle décrite dans [63]. La troisième classe concerne les *approches algorithmiques* qui doivent être considérée au cas par cas, reposent sur une heuristique ou sur un modèle état-transition décrivant le phénomène détecté [64-66]. Elles utilisent des méthodes ou des procédures pour construire et mettre à jour le modèle sur la base de la caractérisation choisie.

L'utilisation de modules ou de sous-systèmes de détection pour la récolte d'information peut nécessiter dans quelques cas une surconsommation d'énergie comparativement à la radio ou même supérieure à la consommation d'énergie du nœud capteur lui-même. Certains capteurs nécessitent intrinsèquement d'importantes ressources afin d'accomplir la tâche d'échantillonnage, on peut citer l'exemple de capteurs d'image CCD ou CMOS, voir les capteurs multimédias. D'autres capteurs peuvent récolter des données sur des phénomènes détectés en utilisant des dispositifs actifs (i.e., sonar, radar ou laser) puis, transmettent des signaux de test afin d'obtenir des informations sur la quantité d'information observée. Le temps d'acquisition peut être de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes, voir quelques secondes, impliquant un accroissement de la consommation du module détection même si la consommation d'énergie du capteur lui-même est modérée. Par ailleurs, disposer de convertisseurs A/D à haut débit et haute résolution peuvent engendrer une surconsommation. Il est donc nécessaire d'apporter des modifications sur les programmes en réduisant le nombre d'acquisitions, c'est-à-dire, le nombre d'échantillons limitant ainsi les communications. Sachant que les échantillons mesurés peuvent être corrélés, les techniques basées sur l'*échantillonnage adaptatif* sont en mesure d'exploiter de telles similarités afin de réduire la quantité de données pouvant être acquise par les transducteurs. A titre d'exemple, si les données utiles évoluent de manière lente et sans grandes variations, il est alors inutile d'effectuer plusieurs acquisitions. Une approche identique peut être appliquée lorsque le phénomène étudié n'évolue pas fortement dans les zones couvertes par les nœuds très proches. L'énergie due à l'échantillonnage peut être réduite en profitant des corrélations spatiales des données perçues. Concernant l'*échantillonnage hiérarchique*, il considère que chaque nœud capteur dispose de sa propre résolution et consommation d'énergie. Les clusters formant le réseau sont sélectionnés puis activés dynamiquement afin d'assurer un compromis précision-consommation. Adoptant la même stratégie que l'approche prédictive, l'*échantillonnage actif* construit un modèle du phénomène détecté à partir des données acquises avec comme perspectives de réduire le nombre d'échantillons et donc la consommation d'énergie [67].

3. Techniques basées sur la mobilité des nœuds capteurs

Dans un RCSF particulièrement statique, les paquets de données peuvent emprunter plusieurs chemins avec des sauts multiples afin d'atteindre une destination souhaitée (i.e. une station de base, puits). Des chemins ou des nœuds sont sollicités plus que d'autres pour relayer les données peuvent provoquer des phénomènes de contention ou de congestion se traduisant directement par une consommation importante d'énergie et donc vers un épuisement prématuré des nœuds en question [60].

La présence de nœuds mobiles dans le réseau (incluant les nœuds puits) peut améliorer la fluidité du trafic, ils permettent aux nœuds de prospecter tout le réseau répartissant ainsi de manière uniforme, la consommation énergétique. Jouant le rôle de points de collecte de données à chaque fois qu'ils sont au voisinage d'une source (i.e. nœuds statiques), la présence de nœuds mobiles permettent de prospecter la totalité du réseau limitant à la fois, le nombre de sauts et la portée pour acheminer l'information. Ainsi, la consommation d'énergie se retrouve répartie de manière uniforme, conséquence, les phénomènes de contention ou de congestion sont amoindris et donc plus d'économie d'énergie.

Il est intéressant de souligner l'importance des stratégies de contrôle des nœuds mobiles pour assurer une meilleure fluidité des déplacements [68-69]. Des problèmes d'interaction des nœuds mobiles avec l'environnement opérationnel peuvent provoquer des détériorations physiques et non respect des trajectoires optimales conduisent à une perte importante d'énergie.

On distingue deux catégories de nœuds mobiles, ceux faisant partie soit de l'infrastructure du réseau et où la mobilité est totalement contrôlée avec des nœuds capteurs considérés tout simplement comme entités robotiques, soit ceux évoluant dans un environnement de déploiement sans aucun contrôle appliqué. Ainsi, en fonction du type d'entité mobile, nous distinguons deux approches: approche basée sur la mobilité des nœuds puits et l'approche basée sur la mobilité des nœuds relais (Figure-2.9).

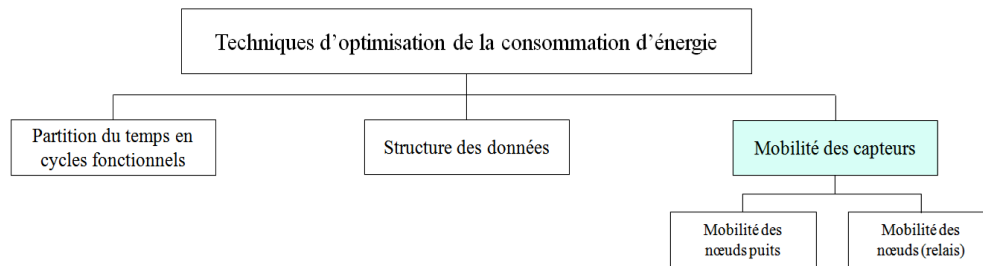


Figure 2.9 Taxonomie des techniques basées sur la mobilité des nœuds

L'ensemble des approches proposées dans la littérature utilisant les techniques basées sur la *mobilité des puits* s'appuie sur des méthodes de programmation linéaire destinées pour l'optimisation de paramètres, tels que la durée de vie du réseau, la QoS, etc. A titre d'exemple dans [70], un modèle considérant un puits mobile se déplaçant dans une grille carrée disposée à l'intérieur d'une zone de détection a été proposé. Lors de la prise de contact, le puits s'immobilise pendant un laps de temps puis communique directement avec son voisinage immédiat. Les nœuds capteurs éloignés lui communiquent leurs messages via une transmission multi-sauts. L'objectif ici étant de déterminer le temps d'attente optimal du nœud puits. Un autre modèle similaire proposé dans [71] qui utilise plusieurs puits mobiles a montré que la durée de vie du réseau peut-être prolongée d'un facteur de cinq à dix fois qu'une approche mettant en œuvre des puits statiques. Une extension du modèle développé dans [70] sans aucune hypothèse considérée sur la disposition des nœuds capteurs dans la zone de captage a été proposée dans [72]. L'approche prend en compte l'énergie résiduelle des capteurs en adoptant un choix adéquat sur la politique de routage à appliquer doublant ainsi les performances de [70]. Une approche basée sur la mise en œuvre d'un protocole distribué a été proposée dans [73]. Elle met en avant une structure GMRE²³ dont laquelle le nœud puits sélectionne une zone de détection disposant d'une énergie résiduelle importante via un nœud sentinelle choisi au niveau de chaque zone de détection. Le nœud détermine l'énergie à partir des nœuds environnants et répond à la requête provenant du puits mobile. Ce dernier utilise cette information pour décider s'il doit ou non se déplacer vers la zone de détection.

Les modèles mettant en œuvre des *relais mobiles* pour la collecte de données ont été largement étudiés dans le cas des réseaux opportunistes [68]. Ces approches, du moins les plus connues utilisent des

²³ Greedy Maximum Residual Energy

structures de transbordement des messages [74-75] via des nœuds mobiles particuliers, i.e., *transbordeurs de messages*, introduits dans le réseau afin d'assurer le service de relayage des messages. Les transbordeurs évoluent dans le réseau en collectant des données à partir des nœuds sources, transportés puis acheminés vers les nœuds destinataires (Figure-2.10).

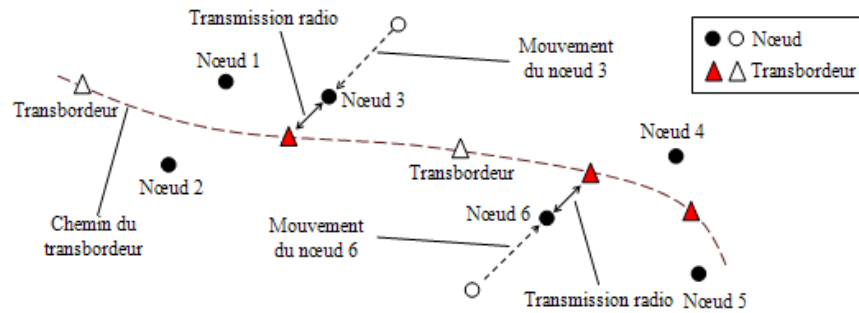


Figure 2.10 Transbordement des messages dans un RCSF

Une structure similaire (Figure-2.11) basée sur une architecture de fonctionnement trois-tiers a été proposée dans le contexte des RCSF complexes : data-MULE²⁴ [76-77]. Le niveau inférieur comprend l'ensemble des nœuds qui périodiquement réalisent un échantillonnage des données. Le niveau intermédiaire est constitué de l'agent mobile MULE pouvant se déplacer dans la totalité de la zone de captage afin de collecter des données déjà stockées temporairement dans des buffers internes. Cet agent peut être une personne, un animal ou un véhicule qui en général, évolue de manière autonome empruntant des chemins aléatoires. Arrivé à portée d'un capteur, il récupère les informations adéquates. Le niveau supérieur est constitué d'un ensemble de points d'accès recevant des informations à partir de l'agent MULE. Ils sont reliés à un nœud puits dont lequel les données reçues sont mémorisées et synchronisées, les redondances sont identifiées et des accusés de réception sont délivrés en conséquence.

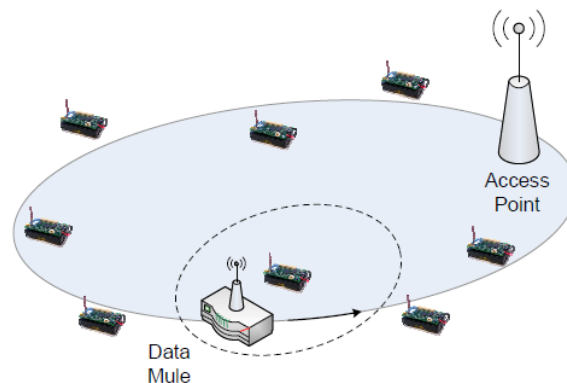


Figure 2.11 RCSF avec relais mobile

La communication capteur-Agent MULE utilise des signaux radio de courte portée diminuant de fait la consommation d'énergie. Dans [78] et [79], les relais mobiles sont supposés se déplacer le long d'un chemin prédéfini d'avance, car dans un RCSF il est très difficile de modifier la trajectoire d'un nœud relais pour plusieurs raisons, à savoir, la présence d'obstacles, terrains escarpés et où en général, des véhicules autonomes ne peuvent se déplacer que sur certaines directions.

L'économie énergétique doit être prise en compte par le fait qu'un grand nombre de nœuds capteurs situés à proximité de la trajectoire de relais mobile transmettent directement leurs données. Les nœuds capteurs se trouvant éloignés, utilisent des chemins différents sur plusieurs sauts via des nœuds

appelés *nœuds cachés*. Cela revient moins coûteux en termes de consommation d'énergie car les communications s'effectuent via des liaisons radio très courtes. Ce qui n'est pas le cas dans le contexte des RCSF denses et dont les récepteurs sont statiques. Les nœuds capteurs s'auto-organisent en clusters dont lesquels des chefs de groupes sont constitués pour assurer la communication avec les relais mobiles. Ils sont généralement très proches des trajectoires que les relais mobiles doivent emprunter. L'ensemble des nœuds appartenant à chaque groupe transmettent via un protocole de diffusion directe, leurs données vers les chefs de groupes respectifs, ces derniers les stockent puis les transmettent à leurs tours vers le relais mobiles.

Ce système de collecte d'information représente une solution efficace pour l'optimisation de la consommation d'énergie. Il permet de garantir la scalabilité et la flexibilité quelque soit la taille du réseau. Malheureusement, elle présente un inconvénient du fait que les mouvements d'un agent MULE sont aléatoires et imprévisibles. Le temps de latence mis par les données pour atteindre la destination (puits) peut être considérable car les intervalles de temps qui s'écoulent entre la phase d'échantillonnage et la collecte des données par l'agent MULE, puis l'acheminement de ce dernier vers un point d'accès, peuvent être trop importants. Un autre inconvénient est que l'ensemble des nœuds doit se mettre en attente (mode réveil) jusqu'à ce que l'agent MULE passe dans leur voisinage pour lui transmettre des données. Cela conduit à une perte d'énergie. L'idée est de considérer plusieurs agents MULE permettant de couvrir la totalité du réseau afin d'éviter des temps d'attente importants à l'ensemble des capteurs [78-80].

L'une des applications type de ce modèle est le développement d'un véhicule autonome sous-marin pour l'exploitation et la modélisation du comportement des écosystèmes marins [81-82]. On peut citer d'autres systèmes utilisant le même principe d'agents messagers tels que ZEBRANET qui est un système doté de capteurs sans fil embarqués sur des dispositifs mobiles [83] et destinés à traquer des zèbres dans la faune, ou encore SWIM utilisé aussi pour la surveillance des baleines dans les océans [84-85].

2.4 Analyse et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art sur les RCSF dont lequel nous avons présenté les composants d'un nœud capteur, l'architecture fonctionnelle et quelques orientations pour l'amélioration de l'autonomie, la longévité et la consommation d'énergie. Nous avons étudié de manière exhaustive et discuté de l'apport des approches de conservation d'énergie en portant une attention particulière aux solutions proposées dans la littérature. L'ensemble de ses travaux, considèrent non seulement l'état opérationnel du capteur mais aussi l'ensemble des paramètres et des approches pouvant avoir une influence sur le fonctionnement global du réseau (données, mobilité, routage, etc.). En s'appuyant sur un constat que la phase de transmission nécessite plus d'énergie pour acheminer l'information entre les nœuds, des travaux de recherche doivent être entrepris dans ce sens afin de concevoir de nouvelles techniques permettant d'apporter de meilleures solutions en termes d'optimisation énergétiques. Dans ce contexte, nous avons identifié trois principales approches, à savoir, la gestion et la partition du temps en cycles fonctionnels, les approches orientées données et celles basées sur la mobilité des capteurs.

Les approches basées sur la partition du temps en intervalles fonctionnels des capteurs sont en général insensibles aux données échantillonnées lors de la capture. Ces dernières peuvent avoir un impacte important sur l'énergie consommée, et par conséquent, le recours à l'utilisation d'approches orientées données s'avère plus qu'intéressant puisqu'elles sont en mesure d'apporter des solutions supplémentaires pour accroître l'efficacité de l'optimisation énergétique. Ces approches traitent des données pendant la phase d'acquisition d'information évitant la prise en charge d'échantillons inutiles. Etant donné qu'une information échantillonnée dispose en général d'une forte corrélation spatiale et/ou temporelle dans le réseau, il n'est donc pas nécessaire par exemple, dans le cas d'un cluster

²⁴ Mobile Ubiquitous LAN Extensions

donné, de communiquer des informations redondantes à la station de base. Ce qui se traduit par un gain énergétique. Ces approches permettent de réduire la quantité des données échantillonnées tout en maintenant la précision des sous-systèmes de détection, particulièrement quand ils sont à vide d'énergie. Les approches basées sur la mobilité des nœuds capteurs permettent de prendre en compte et de contourner les phénomènes de contention ou de congestion afin d'éviter une surconsommation d'énergie et donc l'épuisement prématuré des nœuds en question. En revanche, des délais d'attente importants peuvent s'y produire quelques fois pour le débordement des messages. En effet, des nœuds mobiles peuvent rencontrer des situations où des messages ne parviennent plus du voisinage et donc pouvant retarder le relai de l'information vers la cible. À notre humble avis, ces approches ne doivent pas être considérées comme des alternatives ou concurrentes, mais plutôt doivent être exploitées ensemble pour tirer profit de chacune d'elles.

La plupart des solutions proposées dans la littérature supposent que la phase de transmission radio consomme plus d'énergie que les phases d'échantillonnage ou de traitement des données. Or, il existe des applications réelles où la consommation est presque identique dans l'ensemble des phases car il se peut que la phase d'échantillonnage nécessite plus de temps que celle de la transmission de données. Ainsi, la consommation d'énergie du capteur lui-même peut être très élevée aussi. Nous pensons que cette partie doit être pleinement explorée.

Un RCSF peut être déployé de manière aléatoire dans des milieux hostiles ce qui le rend vulnérable à de multiples pannes allant de la défaillance physique causée par des facteurs environnementaux jusqu'à l'absence de ressources énergétiques dues à l'épuisement du dispositif batterie. Une intervention humaine est généralement difficile ou quasi-impossible à effectuer en raison de l'emplacement des capteurs. Garantir un fonctionnement efficace avec un accroissement de la longévité du réseau en se limitant uniquement à une solution matérielle reste insuffisant. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres solutions logicielles qui permettraient de maîtriser l'exploitation de l'information dès sa source jusqu'à son acheminement vers sa destination en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des capteurs, i.e., faibles capacités de stockage et de puissance de calcul, et des contraintes énergétiques associées. Répondre en partie à ces besoins, passe par le développement d'outils informatiques et de stratégies protocolaires en modes basse consommation mettant en œuvre des mécanismes basés sur des techniques de routage d'informations. Les travaux développés dans cette thèse rentrent dans ce cadre d'étude.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les approches de routage d'information utilisées dans les RCSF, leur apport pour l'optimisation de la consommation énergétique et les problématiques qui restent d'actualité.

Chapitre 3

Mécanismes de routage d'informations pour la gestion d'énergie dans les RCSF

L'objectif dans une application type RCSF est d'assurer avant tout la transmission d'informations entre les différents nœuds capteurs selon un protocole de routage établi d'avance. L'amélioration des performances en termes de longévité, de connectivité et de robustesse nécessite une prise en compte de contraintes liées à la consommation énergétique, à la bande passante et à l'exploitation optimale des ressources calculatoires et de mémorisation. Concevoir et implémenter un protocole de routage peut être influencées par de nombreux facteurs qu'il va falloir surmonter avant de pouvoir assurer efficacement la communication des données. Parmi ces facteurs on peut citer le déploiement de nœuds dans le réseau. Dépendante du type d'applications considérées, la phase de déploiement peut affecter drastiquement les performances du routage. Le déploiement peut être déterministe et dans ce cas, les nœuds sont placés manuellement et les données sont acheminées de la source vers la destination via des chemins préétablis d'avance. Il peut être aussi aléatoire en dispersant de manière hasardeuse les nœuds comme dans le cas des réseaux Adhoc. Si la distribution des nœuds n'est pas uniforme, il en résulte qu'une classification optimale du réseau en clusters est plus que nécessaire afin d'assurer la connectivité et permettre une gestion énergétique efficace. Plusieurs études ont montré que la communication entre nœuds dans des zones restreintes, i.e., clusters, donne de meilleurs résultats en termes d'énergie et de bande passante, et l'acheminement de l'information peut dans ce cas être assurée sur plusieurs sauts. Par ailleurs, la durée de vie d'un nœud capteur est fortement liée à celle de sa batterie [16] et le dysfonctionnement d'un ou de plusieurs nœuds capteurs suite à des pannes batterie ou manque de ressources énergétiques peut provoquer des changements topologiques significatifs nécessitant une réorganisation complète du réseau pour assurer le réacheminement des données. Il est donc important de tenir compte du facteur consommation énergétique sans perte de performances et de précision du réseau particulièrement dans le cas d'un RCSF multi-sauts où chaque nœud peut jouer des rôles en tant qu'émetteur de données ou simple routeur.

Dans ce chapitre, nous illustrons brièvement les enjeux et les challenges des applications type RCSF, nous présentons puis explorons l'ensemble des techniques de routage développées ces dernières années en attirant l'attention sur les facteurs améliorant et/ou dégradant les performances et le fonctionnement des réseaux. Nous terminons par une partie analyse sur les mécanismes de routage déjà cités d'un point de vue structurel et fonctionnement afin de nous positionner sur la problématique soulevée dans notre travail de recherche.

3.1 Challenges et enjeux dans les RCSF

Dans un RCSF, un protocole de routage doit nécessairement obéir au choix d'un modèle d'acheminement d'information, dès la phase de détection jusqu'à la transmission [86]. Fortement dépendant du type d'application considérée, plusieurs modèles ont été développés, et dont la mise en œuvre doit tenir compte de paramètres critiques. Parmi ces paramètres, on peut citer les délais critiques nécessaires pour la détection puis la transmission de la donnée. Comme dans le cas des applications nécessitant une gestion périodique des données, où les nœuds basculent périodiquement dans leurs fonctionnalités de simple capteur vers un nœud transmetteur de données et vis versa, ces modèles sont bien adaptés. D'autres modèles considèrent la transmission sur la base de l'établissement de requêtes par exemple, par la station de base ou suite à l'apparition d'événements. Dans ce dernier cas, les nœuds capteurs réagissent immédiatement suite à des changements brusques sur les valeurs détectées. Il faut noter que la combinaison de ces modèles est possible.

Il existe des applications où les réseaux sont homogènes, i.e., les nœuds capteurs disposent des mêmes capacités calculatoires et de mémorisation, de paramètres de communication identiques, de la même quantité d'énergie et destinés à réaliser les mêmes fonctionnalités. Or, il peut y avoir d'autres applications où les nœuds ont des capacités et des rôles différents formant un réseau complètement hétérogène. Cette hétérogénéité peut soulever plusieurs questions techniques liées à l'acheminement et au routage des données. Par exemple, certaines applications peuvent nécessiter une diversité de capteurs pour le contrôle de la température, la pression et l'humidité du milieu environnemental, la détection de mouvements par l'intermédiaire de signatures acoustiques, et la capture d'images ou la poursuite d'objets en mouvement par vidéo. La lecture et l'acheminement des données peuvent être réalisés à des fréquences différentes selon plusieurs modèles avec une qualité de service minimale. Comme dans le cas par exemple des structures réseaux hiérarchiques, où des nœuds capteurs type Cluster-Heads (CH) jouent un rôle différent que les nœuds ordinaires. Sélectionnés juste après le déploiement du réseau, et contrairement aux autres nœuds capteurs, les nœuds CHs sont plus puissants en termes d'énergie, de bande passante et de mémoire. L'agrégation des données provenant de plusieurs sources différentes est une fonctionnalité importante réalisée par les CHs. Elle permet d'éliminer les redondances d'information (suppression des doublons, minima, maxima et moyenne), et donc d'optimiser le nombre de messages à acheminer vers la station de base. Ainsi, ces techniques d'agrégation et de fusion de données permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie au niveau de chaque nœud capteur et celle du réseau dans sa globalité.

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud capteur dispose d'une vue d'ensemble de son environnement opérationnel. Cette vue est limitée par sa précision et par la portée du signal qui est souvent limitée lui permettant de couvrir qu'une zone restreinte. Par conséquent, mettre en œuvre un protocole de routage nécessite également de prendre en compte la zone de couverture en tant que paramètre important dans la conception du réseau. Il en est de même pour la connectivité, qui est importante en fonction de la densité du réseau. Le nombre de nœuds déployés dans l'environnement est de l'ordre des centaines ou des milliers voire plus. Plus le réseau est dense, moins les nœuds capteurs sont isolés et plus les liens entre les nœuds sont réels, la connectivité est importante.

Certains nœuds peuvent tomber en panne suite à une défaillance physique ou tout simplement en raison d'un manque de puissance. Ces pannes ne doivent en aucun cas influencer le fonctionnement du réseau. Les protocoles de routage et les méthodes d'accès au canal MAC (i.e., IEEE 802.11, Bluetooth) type TDMA et/ou CSMA, doivent être évolutifs et en mesure de former de nouveaux liens et de nouveaux clusters pour permettre aux données d'être acheminées à leurs destinations tout en optimisant des critères, qu'ils soient énergétiques, délais d'acheminement bout-en-bout, etc.

La mobilité des nœuds capteurs peut être exploitée dans des mécanismes de routage comme facteur de réduction de la consommation énergétique. Dans un RCSF statique, les paquets de données peuvent emprunter plusieurs chemins avec des sauts multiples afin d'atteindre une destination souhaitée (i.e. une station de base, puits). Or, il peut y avoir des chemins ou des nœuds plus sollicités que d'autres

pour relayer les paquets de données impliquant des phénomènes de contention ou de congestion se traduisant directement par une consommation importante d'énergie et donc un épuisement prématuré des nœuds en question [60]. La présence de nœuds mobiles dans le réseau (incluant les nœuds puits) peut améliorer la fluidité du trafic, elle permet aux nœuds de prospecter tout le réseau répartissant ainsi de manière uniforme, la consommation énergétique. Jouant le rôle de points de collecte de données à chaque fois qu'ils sont au voisinage d'une source (i.e. nœuds statiques), les nœuds mobiles limitent à la fois, le nombre de sauts et la portée pour acheminer l'information. Conséquence, les phénomènes de contention ou de congestion sont amoindris et donc plus d'économie d'énergie. Les modèles développés dans ce contexte ont été largement utilisés dans le cadre des réseaux opportunistes [68]. L'approche GMRE en est un parfait exemple à citer. Le nœud puits sélectionne via un nœud sentinelle choisi au niveau de chaque zone de détection disposant chacune d'une énergie résiduelle très élevée [73]. Le nœud détermine l'information d'énergie à partir des nœuds environnants et répond à la requête provenant du puits mobile pour décider s'il doit ou non se déplacer. L'une des approches les plus connue qui a été développée dans [74-75] utilise le concept de transbordement des messages et qui consiste à introduire dans le réseau des nœuds mobiles particuliers, (i.e., transbordeurs de messages) afin d'assurer le service de relayage des messages. Ces transbordeurs évoluent dans le réseau en collectant des données à partir des nœuds sources, puis transportés et acheminés vers les nœuds destinataires. La problématique est qu'il peut y exister des situations où un nœud mobile se mette en position d'attente de message sans réponse et dans ce cas, des retards colossaux peuvent être engendrés conduisant inéluctablement à un dysfonctionnement momentané du réseau.

Dans de nombreuses applications, assurer un routage efficace passe tout d'abord par une optimisation de l'énergie déployée par l'ensemble des nœuds capteurs au détriment de l'amélioration de la qualité de service, et cela afin d'accroître la longévité du réseau et améliorer ou assurer la qualité des données transmises revient au second plan. Or, dans certaines applications, les informations doivent être acheminées pendant des délais très courts afin de maintenir la fraîcheur et la qualité des données transmises. Il est donc primordial de limiter le temps de latence lié à la délivrance des données afin d'assurer une qualité de service acceptable.

L'ensemble de ces challenges et enjeux nous conduise à structurer et à classer les protocoles de routages en fonction des objectifs souhaités. Nous présentons dans ce qui suit la taxonomie des mécanismes de routage d'informations dans les RCSF abordés sous l'angle optimisation énergétique.

3.2 Taxonomie des mécanismes de routage dans les RCSF

La classification des mécanismes ou protocoles de routage dans les RCSF peut être abordée sous plusieurs angles différents [12]. D'un point de vue structurel (Figure-3.1), c'est-à-dire en fonction de la topologie du réseau et des paradigmes choisis pour l'optimisation des fonctions coûts, et on peut citer les structures *centrées données*, i.e., *plates* où l'ensemble des nœuds capteurs disposent des mêmes fonctionnalités et jouent le même rôle dans le traitement de l'information. En revanche, dans les structures *hiérarchiques*, les nœuds n'ont pas un même rôle. En fonction de leur hiérarchie dans le réseau, ils peuvent avoir des privilèges tels que la réalisation des calculs et la communication avec la station de base. Dans le *routage basé sur la localisation*, les positions des nœuds capteurs sont exploitées pour router et acheminer les informations. Chaque capteur dispose d'un système de localisation tel que le GPS lui permettant de calculer sa position et ainsi la transmettre vers le nœud cible.

D'un point de vue fonctionnel, cela dépendra des types d'applications mises en œuvre. On peut citer des techniques de routage basées sur la *négociation* pour le dialogue entre nœuds capteurs, l'établissement des *requêtes*, la *cohérence*, l'amélioration de la *qualité de service* QoS¹ lors de

¹ Quality of Service

l'échange des données et *multi-chemins* pour améliorer la fiabilité et les performances. Cette dernière technique étant très proche des techniques qui se basent sur la topologie plate.

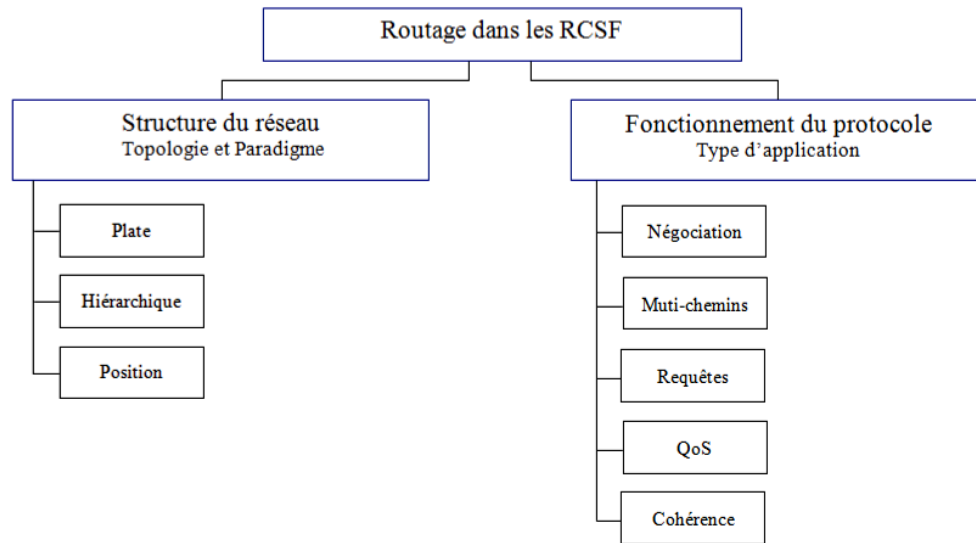


Figure 3.1 Mécanismes de routage dans les RCSF

Ces mécanismes de routage peuvent aussi être classés en fonction des critères d'établissement de chemins entre les nœuds capteurs source-cible. On en distingue une classe de *protocoles proactifs* dont laquelle plusieurs chemins sont déterminés sans pour autant éprouver le besoin de les utiliser. Contrairement à la classe de *protocoles proactifs*, dans la classe des *protocoles réactifs*, les chemins possibles pour atteindre la cible, sont déterminés à la demande. Les *protocoles hybrides*, combinent à la fois les protocoles proactifs et réactifs. Or, comme les nœuds sont statiques, il est préférable d'utiliser des tables de routage au détriment d'informations fournies par les protocoles réactifs. Ainsi, l'énergie consommée sera minimisée lors de la recherche de chemins et la configuration des protocoles réactifs sera évitée. Dans le cas de la classe des *protocoles coopératifs*, les nœuds capteurs acheminent des informations vers un nœud central afin d'être agrégées puis traitées. Cela permet d'atténuer le nombre de chemins pour atteindre directement la station de base et donc d'optimiser la consommation d'énergie.

1. Routage basé sur la structure et la topologie du réseau

Comme souligné ci-dessus, on peut distinguer plusieurs mécanismes de routage d'informations en fonction de l'organisation structurelle et des paradigmes utilisés pour l'optimisation des performances du réseau. Dans ce qui suit, nous examinons l'ensemble des protocoles mis en œuvre dans ce contexte.

1.1 Routage centré données

La première catégorie concerne les protocoles de routage plats multi-sauts. Les nœuds capteurs collaborent entre eux pour mener à bien leurs tâches, seule la station de base est chargée pour la collecte d'informations [87-88]. Etant donné qu'un RCSF dispose en général de dizaines, voir des centaines ou des milliers de nœuds capteurs, il est impossible d'en affecter à chacun un identifiant. Il en résulte ainsi un routage centré principalement données, où la station de base envoie des requêtes vers certaines zones présélectionnées dans le réseau et se met en attente (Figure-3.2).

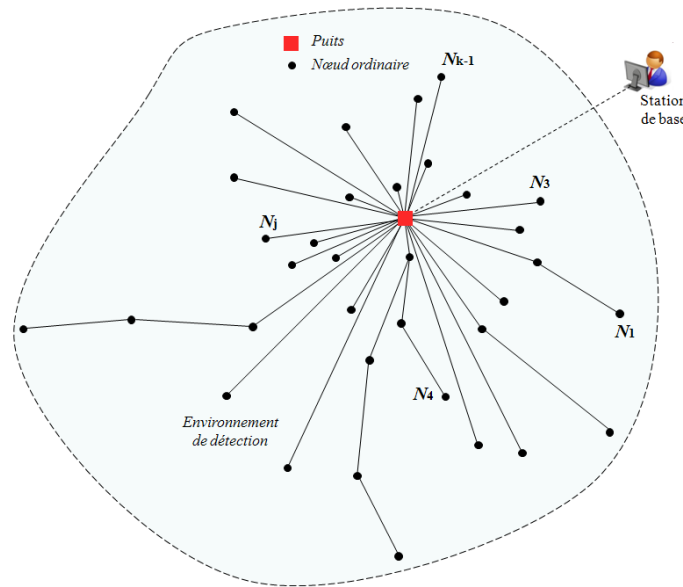


Figure 3.2 Architecture centralisée à topologie plate

La topologie associée à cette famille de protocole se caractérise par une grande tolérance aux pannes lors de la construction de nouveaux chemins, donc des coûts de maintenance très bas. Néanmoins, un nombre important de messages de contrôle est utilisé pour assurer le bon fonctionnement du réseau sans pour autant améliorer la scalabilité. Des changements structurels ou de topologie, i.e., perte de nœuds suite à des pannes ou manque d'énergie, peuvent dans certains cas dégrader les performances du réseau. Les nœuds, particulièrement ceux qui sont très proches du voisinage de la station de base, sont souvent sollicités et leur perte peut conduire à une surconsommation d'énergie diminuant ainsi la longévité du réseau.

Des travaux précurseurs tels que SPIN² ou diffusion directe [89] ont montré leur efficacité du point de vue optimisation énergétique en utilisant des méthodes par négociation et d'élimination des redondances. La classe de protocoles de communication SPIN [90-91], a été spécialement conçue pour pallier aux problèmes rencontrés lors de la transmission d'information par inondation, i.e., flooding [92]. Elle permet d'optimiser les ressources au niveau de chaque nœud capteur et de pallier aux problèmes de la duplication et de la redondance des données. Ces protocoles considèrent que l'ensemble des nœuds voisins dispose de données similaires et dont l'un des objectifs étant de fournir et d'exploiter le plus rapidement possible les informations du réseau.

Les nœuds capteurs disposent d'une description complète des données collectées, i.e., métadonnées, utilisées pour la transmission une fois la négociation achevée. Cette description est spécifique à l'application et non pas au protocole SPIN. A titre d'exemple, les nœuds peuvent utiliser leurs identifiants pour signaler des métadonnées sur une région connue. Par ailleurs, le protocole peut s'adapter en fonction du niveau énergétique résiduel des nœuds. Sa mise en œuvre se déroule sur trois étapes étant donné que les nœuds capteurs utilisent trois messages différents ADV, REQ et DATA. Une fois les données collectées au niveau de chaque capteur, un message d'annonce ADV contenant des métadonnées est diffusé. Si le message intéresse un nœud voisin, ce dernier transmet à son tour une requête vers la source pour recevoir les données via un message DATA correspondant au message d'annonce. Le message DATA comprenant les données proprement dites, est acheminé vers le destinataire, i.e., le demandeur qui réitère le même processus avec ses voisins et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'ensemble des nœuds de la zone disposent des mêmes données récoltées par le premier nœud. Le protocole s'adapte selon les changements topologiques car ils sont localisables et que chaque nœud

² Sensor Protocols for Information via Negotiation

a une connaissance sur ses voisins. Cependant, le mécanisme d'annonce de présence de données n'est pas efficace car il ne garantit pas la livraison des données.

Un autre protocole simple, réactif et efficace développé pour les réseaux Adhoc et MANET dit DSR³ utilise le routage dynamique pour déterminer la séquence de nœuds nécessaires pour acheminer les données vers la destination, i.e., puits [93-94]. Il s'autogère et se configure de manière autonome via deux mécanismes : la découverte automatique de chemins, i.e., *Route Discovery*, et maintenance et correction en ligne des itinéraires, i.e., *Route Maintenance*. Chaque nœud dispose d'une table de routage contenant l'ensemble des itinéraires à emprunter. La recherche d'un chemin passe par une inondation du réseau par des paquets de messages *Route Request*, les nœuds recevant ces paquets consultent tout d'abord leurs tables de routage, si la recherche est productive, ils renvoient à leurs tours au nœud source et de manière unicast les messages *Route Reply* contenant la liste des nœuds appropriés à suivre dans l'ordre afin d'arriver à la destination. Dans le cas contraire, le chemin n'existant pas dans la table de routage, le nœud transfère le message *Route Request* vers d'autres voisins en y ajoutant son adresse à la séquence des nœuds stockée dans sa table. Faisant partie de la même famille des protocoles réactifs, AODV⁴ utilise le concept de vecteur de distance en se basant sur les chemins sauvegardés dans les tables de routage et les numéros de séquences contenus dans les messages de contrôles [95]. La recherche des chemins passe par la diffusion de message de recherche de routes à travers tout le réseau qui est relayé par l'ensemble des nœuds (sur un seul saut) jusqu'à la destination. Une fois atteinte, cette dernière renvoie à la source et sur le même chemin un message de réponse. Elle enregistre une trace de la requête puis la diffuse à son tour à l'ensemble des autres nœuds. Si la source ne reçoit pas de réponse à sa requête alors elle renvoie une seconde requête en augmentant le nombre de sauts. Et ainsi de suite jusqu'à déclarer que la destination recherchée est inatteignable. Dans le cas d'une rupture de liens, un message d'erreur est envoyé vers la source et la route est détruite de la table de routage des nœuds intermédiaires. C'est un concept très utile particulièrement dans le cas de cassure de chemins.

Contrairement à AODV implémenté dans les réseaux moins denses, le protocole MCFA⁵ assure la scalabilité et l'optimisation de l'acheminement des données vers la destination via des chemins plus courts à moindre coût [89]. La mise en œuvre du protocole passe dans un premier temps par une configuration du réseau déclenchée par le nœud puits en initialisant un arbre de descente du gradient des différents nœuds capteurs vers le puits. La valeur de gradient peut être dérivée à partir d'un certain nombre de variables c'est à dire, le nombre de sauts nécessaire pour atteindre le nœud puits, l'énergie résiduelle, la distance et/ou la puissance du signal reçu, i.e., RSS⁶. Chaque nœud capteur conserve la valeur du gradient lui permettant d'atteindre le nœud puits et le coût de la liaison avec le nœud parent dans l'arborescence de la descente de gradient. La création de cette arborescence permet d'éliminer toute boucle de routage dans le réseau, en revanche des faiblesses subsistent particulièrement dans le cas des réseaux probabilistes. La présence de nœuds capteurs défaillants nécessite une reconfiguration du réseau induisant une suppression de l'ensemble des parquets de données localisée tout au long de la branche défaillante diminuant ainsi la robustesse du protocole.

Basé sur le même principe de fonctionnement que DSR, le protocole de routage à diffusion dirigée, i.e., *Directed Diffusion*, est un protocole centré sur les données dont la propagation utilise plusieurs chemins pour atteindre la destination [88][96]. Il simplifie les traitements liés au processus de routage tels que la suppression de la rediffusion inutile de paquets en s'appuyant sur un modèle *publish/subscribe* intégrant quatre phases de traitement : nomination des données, propagation des intérêts et établissement des gradients, propagation des données et renforcement des chemins. Lors de

³ Dynamic Source Routing

⁴ Adhoc On Demand Distance Vector

⁵ Minimum Cost Forwarding Algorithm

⁶ Received Signal Strength

la nomination des données, un schéma *attribut-valeur* est utilisé pour décrire les intérêts et les données. La description consiste à établir et diffuser des requêtes avec un intérêt et en réponse, les nœuds structurent les données selon le même schéma que celui des requêtes, mais avec de nouvelles données (Figure-3.3).

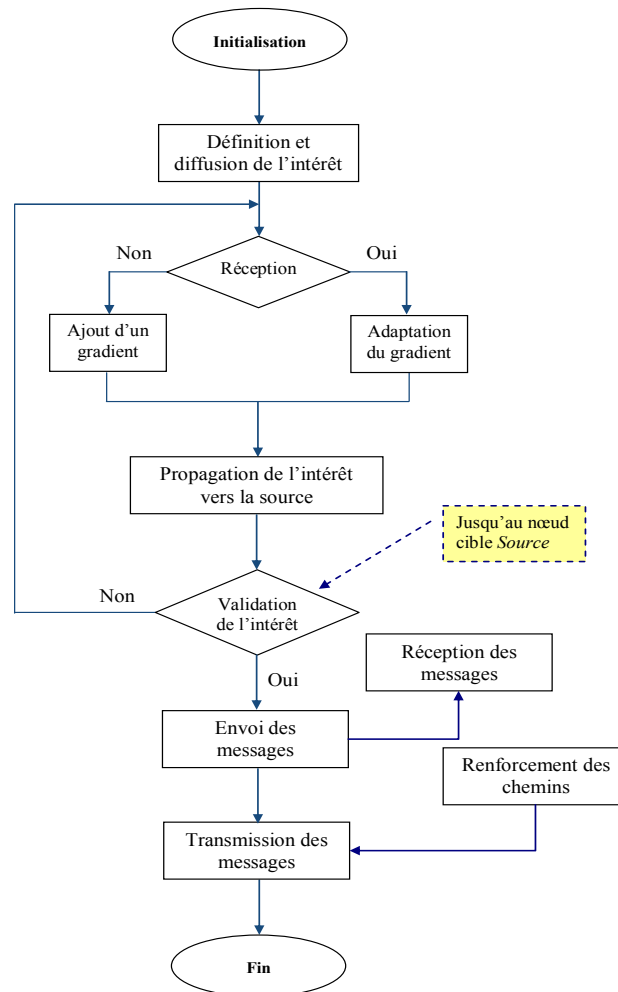


Figure 3.3 Organigramme du protocole de routage à diffusion dirigée

Lorsqu'un puits requiert une donnée, il propage un message d'intérêt contenant sa description et le débit d'information souhaité. Il explore tous les chemins en inondant le réseau par des messages d'intérêts afin d'établir les gradients associés caractérisés par une direction modélisée par le voisin émetteur de l'intérêt et une amplitude représentée par le débit des données. Une fois le message d'intérêt reçu, chaque nœud parcourt son cache pour vérifier l'existence de l'entrée relative à l'intérêt reçu. Deux possibilités se présentent : soit une nouvelle entrée est créée avec un gradient vers le voisin émetteur, soit le nœud recherche un gradient vers le voisin émetteur, et met à jour l'entrée en question. Après traitement du cache, le nœud relaye l'intérêt vers ses voisins par inondation. Une fois la diffusion des intérêts atteint les sources ciblées, la récolte d'information prend effet. Pour un intérêt donné, un capteur calcule le débit le plus élevé et prélève en conséquence les données. En consultant les gradients relatifs à l'intérêt, le nœud estime les prochains sauts vers les puits (chacun avec son propre débit). Si le nœud capteur reçoit un message, via son cache, il détermine l'intérêt correspondant et en consultant la liste des gradients, il relaye le message vers ses voisins en fonction du débit associé. Ainsi de suite, un nœud voisin à son tour recevant un message de l'un de ses voisins, consulte son cache pour vérifier s'il ne l'a pas reçu précédemment et s'il y a une correspondance avec l'un des intérêts stockés. Si c'est le cas, il le stocke et renvoie le message vers le voisin suivant, dans le ca

contraire, il supprime le message et ainsi de suite jusqu'à atteindre le puits. Si aucun intérêt n'est disponible dans le cache, alors le paquet est tout simplement supprimé.

Lors de l'exploration, le puits diffuse à faibles débits des intérêts en établissant des gradients afin de renforcer les chemins optimaux. Lorsque le puits reçoit les premières données exploratrices à partir d'une source quelconque via plusieurs chemins, le puits renforce le chemin vers le voisin émetteur en augmentant le débit de capture. Ce même voisin adopte le même comportement que le puits jusqu'à atteindre le nœud cible, i.e., source, en établissant les gradients. Le renforcement ne doit pas s'arrêter au niveau des voisins du puits, mais doit se propager éventuellement jusqu'à la source. Une fois l'exploration achevée, la récolte d'informations débute via un itinéraire bien précis.

Le protocole RR⁷ est une variante du protocole Diffusion Dirigée destiné principalement pour des applications dans lesquelles le routage géographique n'est pas réalisable [97]. En général, la diffusion dirigée utilise le principe d'inondation pour transmettre des requêtes sur l'ensemble du réseau pour lequel aucun critère géographique n'est utilisé. Cependant, dans certains cas, l'application nécessite très peu de données, et donc l'utilisation de l'inondation n'est pas requise. Une alternative consiste à acheminer des requêtes vers des nœuds ayant observé un événement particulier plutôt que d'inonder l'ensemble du réseau. Le protocole RR considère les paquets de données comme agents. Lorsqu'un nœud capteur détecte un événement, ce dernier est rajouté directement dans la table des événements puis génère un agent. Ainsi, l'ensemble des agents générés va évoluer dans le réseau afin de propager les informations relatives aux événements locaux à d'autres nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds ayant une connaissance sur le chemin peuvent apporter une réponse en vérifiant leurs tables d'événements. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'inonder l'ensemble du réseau, ce qui réduit les coûts des communications en termes d'économies d'énergie. Contrairement à la diffusion dirigée où les données peuvent emprunter des chemins multiples, RR maintient qu'un seul chemin entre la source et la destination et permet de gérer des incidents liés aux capteurs, i.e., pannes. Néanmoins, sa mise en œuvre n'est effective que lorsque le nombre d'événements est faible. En effet, si les événements se multiplient de manière significative, les coûts de maintenance des agents et des tables au niveau de chaque nœud deviennent difficiles, surtout si la station de base ne trouve pas d'intérêt pour ces événements.

Le routage basé sur le gradient, GBR⁸ est aussi une variante du protocole DD [15]. L'idée est de mémoriser le nombre de sauts lorsque l'intérêt est diffusé à travers tout le réseau. Chaque nœud peut calculer un paramètre appelé hauteur du nœud correspondant au nombre minimum de sauts nécessaire pour atteindre la station de base. Le gradient correspond à l'écart entre la hauteur du nœud et celle de son voisin et le message transmis emprunte le chemin dont la pente est la plus élevée. GBR utilise des techniques auxiliaires telles que l'agrégation et la propagation des données dans le but de gérer de manière uniforme le trafic par répartition équilibrée des transmissions dans le réseau. Lorsque plusieurs chemins traversent un nœud, i.e., relai, ce dernier peut combiner les données selon une certaine fonctionnalité. Il met en œuvre plusieurs techniques de diffusion de l'information telles que les approches basées sur l'énergie ou sur les flux de données. On peut citer aussi l'approche stochastique dans laquelle chaque nœud peut choisir aléatoirement un gradient parmi d'autres ayant des hauteurs équivalentes mais associées à des sauts différents.

D'autres protocoles tels que COUGAR [86] et ACQUIRE⁹ [87] qui assimilent un RCSF à un entrepôt de données ou à une base de données distribuée. Chaque nœud incorpore des informations temporairement inaccessibles modélisées sous forme d'une table relationnelle avec des attributs sur le capteur lui-même ou sur les données collectées. Dans le cas de COUGAR, une mauvaise transmission d'informations peut conduire à un stockage de données erronées au niveau des nœuds. Pour y remédier, le protocole met en œuvre une interface étendue type SQL pour intégrer des clauses de modélisation

⁷ Rumor Routing

⁸ Gradient-Based Routing

⁹ Active Query Forwarding in Sensor Networks

de la distribution probabiliste. Afin de simplifier les traitements et d'optimiser l'utilisation des ressources, le nœud puits est chargé de générer un modèle de requête permettant de sélectionner des nœuds spécifiques, i.e., CHs. Ces derniers, effectuent des opérations d'agrégation et la transmission des résultats. Etant donné que chaque nœud comprend une file d'attente sur tous les nœuds fils devant lui communiquer des données, la transmission des informations agrégées ne peut se faire que lorsque l'ensemble des nœuds fils auraient transmis la totalité des données. C'est un protocole qui nécessite une synchronisation entre les nœuds fils et les nœuds agrégateurs. Dans le même contexte, ACQUIRE s'appuie sur un mécanisme d'interrogation pour requêter des données nommées. Chaque requête comprend plusieurs sous-requêtes qui pointent sur plusieurs capteurs afin de récolter des données stockées sur une période précise. Chaque nœud a la possibilité d'injecter une requête active dans le réseau de manière aléatoire ou en spécifiant une trajectoire jusqu'à ce qu'une réponse soit établie par d'autres nœuds via un chemin utilisant un mécanisme de mise à jour localisé.

Reposant sur le même principe que la diffusion dirigée, l'idée principale de CADR¹⁰ consiste à interroger les nœuds capteurs puis router les données dans le réseau en maximisant le gain en information tout en minimisant la latence et la bande passante [98]. Les requêtes sont diffusées sur la base de critères d'informations permettant la sélection des capteurs pouvant acquérir les données. Ceci est réalisé en activant seulement les capteurs qui sont proches d'un événement particulier et en ajustant dynamiquement le routage des données. Dans le même contexte, le protocole IDSQ¹¹ permet aux nœuds capteurs générant les requêtes de déterminer l'ensemble des nœuds pouvant fournir les informations pertinentes avec un coût énergétique acceptable. C'est une procédure d'optimisation complémentaire. En revanche, IDSQ ne fournit aucune information sur le routage des requêtes. En termes de consommation d'énergie, le protocole donne de meilleurs résultats que la diffusion dirigée.

1.2 Routage hiérarchique

Le routage hiérarchique proposé dans les réseaux filaires, est une technique connue pour les avantages qu'elle offre du point de vue scalabilité, efficacité des communications, mais surtout du point de vue optimisation de la consommation énergétique dans le cas des RCSF [16]. En fonction du niveau énergétique, les nœuds capteurs ont des niveaux de responsabilité différents, on peut distinguer deux types de nœuds capteurs (Figure-3.4). Ceux disposant d'une énergie faible et qui effectuent seulement des mesures sensorielles et ceux ayant une énergie importante et dont l'objectif étant de réaliser des traitements et la transmission d'informations. Cette distinction permet de signifier que la mise en œuvre de clusters représentés par des nœuds maîtres CHs peut contribuer positivement pour améliorer les performances du réseau en termes de scalabilité, longévité et consommation énergétique. Deux couches de routage sont utilisées, la première permet de sélectionner des CHs sur la base de critères liés à son niveau énergétique, à sa connectivité avec l'ensemble des nœuds appartenant à la même zone et à sa situation géographique dans l'environnement. L'objectif étant de réaliser des traitements souvent par agrégation des données issues de l'ensemble des nœuds capteurs au sein de la même classe, et assurer la transmission de l'information en tant que relais vers la station de base ou vers d'autres CHs. La deuxième couche sert pour le routage proprement dit.

Protocole très approprié pour des applications RCSF type monitoring ou surveillance environnementale, LEACH est un protocole qui se base sur ce type de topologie qui réalise sur une classification du réseau en clusters pour assurer une optimisation adaptative de la consommation d'énergie [16]. Des nœuds sont sélectionnés de manière aléatoire en tant que CHs et dont le rôle étant de communiquer avec l'ensemble des nœuds appartenant aux clusters associés, de centraliser périodiquement les données collectées, de réaliser les traitements, i.e., l'agrégation, et enfin de transmettre directement les résultats vers la station de base si cette dernière est atteignable ou vers

¹⁰ Constrained Anisotropic Diffusion Routing

¹¹ Information-Driven Sensor Querying

d'autres CHs dans le cas contraire. Pour ce faire et afin de réduire et de limiter les collisions, ce protocole implémente au niveau de la couche MAC les méthodes type TDMA/CSMA. Ce rôle doit être équitablement distribué sur l'ensemble du réseau afin d'optimiser et de répartir la charge énergétique.

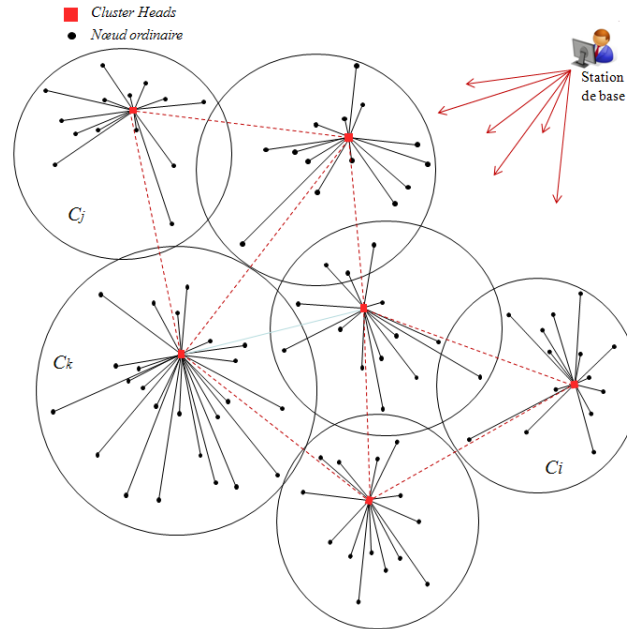


Figure 3.4 Architecture distribuée à topologie hiérarchique

Comme l'illustre la figure 3.5, la mise en œuvre du protocole passe dans un premier temps par une phase d'initialisation du réseau où des clusters sont formés avec des CHs présélectionnés, et dans un second temps par une phase de fonctionnement en régime stable où la communication avec la station de base prend effet.

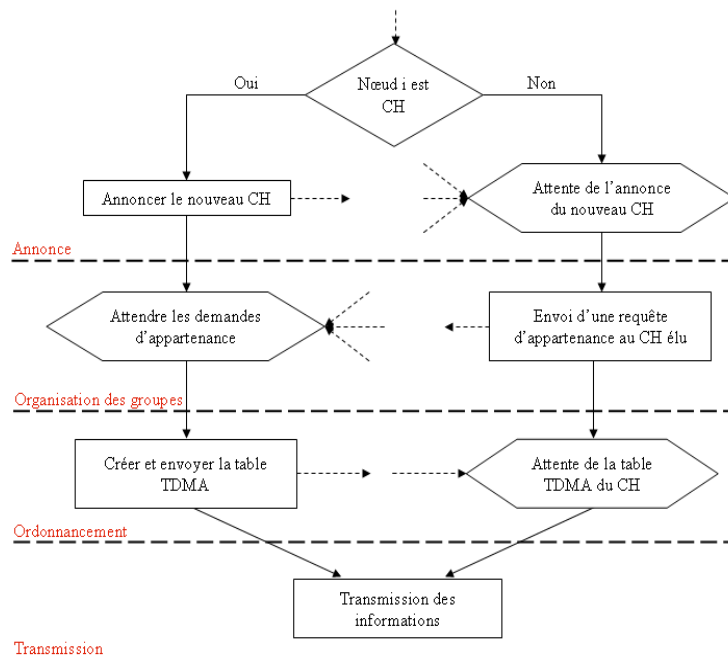


Figure 3.5 Phases de mise en œuvre du protocole LEACH

Durant la phase d'annonce et création de clusters, la station de base annonce le déroulement d'un nouveau round. Avec un pourcentage de sélection des CHs établi d'avance (5%-15%), les nœuds s'auto-élisent pour être des CHs selon une probabilité d'élection définie comme suite :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot \text{mod}(\frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.1)$$

Les paramètres P et r désignent respectivement le pourcentage des nœuds désirant être CH et l'itération ou le round courant. G étant l'ensemble des nœuds n'étant pas des CHs durant les dernières $(\frac{1}{P})$ itérations. Le nombre n étant une valeur aléatoire comprise dans l'intervalle $[0,1]$ attribuée à un nœud. Si cette dernière est inférieure à un seuil $T(n)$, le nœud se déclare CH puis informe ses voisins de son élection. Ainsi, un message d'avertissement contenant son identifiant en tant que CH est diffusé via un protocole MAC CSMA/CA permettant d'éviter de probables collisions et interférences entre les différents CHs adjacents. Les nœuds décident d'appartenir à des CHs en tenant compte de l'amplitude du signal reçu. Le CH ayant diffusé un signal de plus grande amplitude aura une probabilité plus importante d'être choisi par rapport aux autres CHs. En cas d'égalité, le choix d'appartenance à un CH se fait aléatoirement. Cela passe par l'envoi du nœud d'un paquet d'affiliation au CH choisi, et ce dernier renvoi un message d'acquiescement pour la confirmation.

En se basant sur la méthode d'ordonnancement de tâche, il met en œuvre le protocole MAC TDMA et assigne à chacun des NMs de son cluster, un intervalle de temps ou *time slot* pendant lequel le nœud peut communiquer ses informations. L'ensemble des slots assignées aux nœuds d'un groupe constitue un *Frame*, dont la durée diffère selon le nombre de nœuds du cluster.

La phase de transmission ou de collecte d'information permet indirectement de se prononcer sur les performances et la robustesse de l'algorithme de routage. En se basant sur la méthode TDMA, les NMs communiquent leurs données vers leurs CH qui seront agrégées puis transmises directement ou indirectement vers station de base. Les NMs non actifs ont la possibilité de se mettre en veille pour économiser l'énergie.

Plusieurs variantes de ce protocole ont été proposées pour améliorer les performances particulièrement dans le cas de réseaux denses [99-100]. On peut citer V-LEACH¹² où on procède à l'élection d'un CH de la même manière que LEACH, mais aussi à l'élection d'un vice CH permettant de reprendre le rôle du CH en cas de pannes ou d'épuisement énergétique [101]. Une autre variante EACHS¹³ proposée dans [102], elle se base sur la mise en œuvre d'une fonction auto-sélective de CHs, combinant à la fois LEACH avec des paramètres relatifs à la consommation d'énergie. TL-LEACH¹⁴ et M-LEACH¹⁵ deux variantes qui réalisent une transmission multi-sauts pour atteindre la station de base [103-104]. Le routage d'information se base sur l'établissement de chemins optimaux.

Comme l'illustrent plusieurs travaux [105], contrairement à la diffusion dirigée ou à SPIN qui se basent sur l'optimisation des chemins et l'utilisation et l'exploitation d'information sous forme de métadonnées, le protocole LEACH est le seul à fournir de meilleurs résultats en termes de d'optimisation de la consommation énergétique (Tableau 3.1). Cela se vérifie par l'accroissement et le prolongement de la durée de vie du réseau.

¹² Vice-LEACH

¹³ Energy Adaptive Cluster-Head Selection

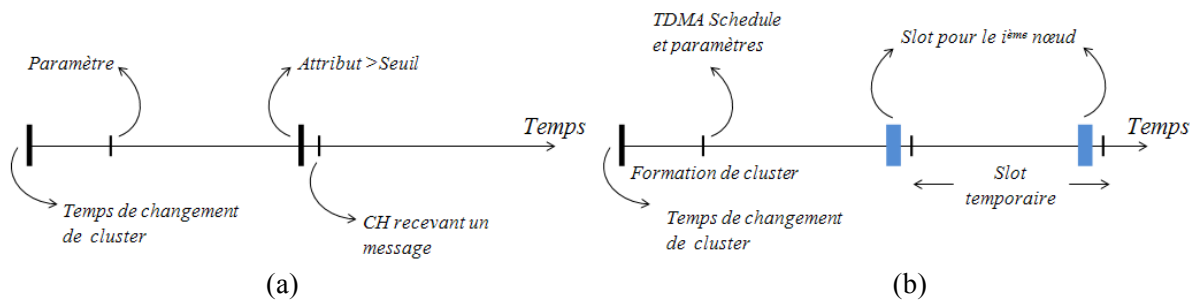
¹⁴ Two Level-LEACH

¹⁵ Multi-hop LEACH

Performances	SPIN	LEACH	Diffusion Dirigée
Optimisation des chemins	Non	Non	Oui
Durée de vie du réseau	Acceptable	Très Acceptable	Acceptable
Optimisation des ressources	Oui	Oui	Oui
Utilisation de Métadonnées	Oui	Non	Oui

Tableau 3.1 Comparaison entre SPIN, LEACH and Diffusion Dirigée

Deux protocoles de routage hiérarchiques TEEN¹⁶ et APTEEN¹⁷ destinés pour des applications à temps critique ont été proposés respectivement dans [107] et [108]. Le protocole TEEN utilise une politique de routage réactive où les nœuds sont en mode détection de manière continue avec des transmissions de données moins fréquentes. Il construit une grappe avec plusieurs branches et plusieurs niveaux jusqu'à atteindre un nœud collecteur de données. L'aspect centré données se justifie par le fait de la mise en place de deux seuils pour les attributs captés. Un seuil dur qui enclenche une transmission d'informations d'un nœud vers le niveau hiérarchique de la grappe, et un seuil flexible qui permet à son tour une communication seulement si la valeur de l'attribut est supérieure. Dès que d'autres nœuds deviennent CHs, ils diffusent de nouvelles valeurs des seuils. (Figure-3.6 a).


Figure 3.6 Fonctionnement des protocoles TEEN et APTEEN

Les nœuds espionnent en permanence leur environnement. Une fois qu'un paramètre de l'ensemble des attributs atteint sa valeur seuil dur, le nœud active son émetteur, mémorise la donnée détectée dans une variable VD puis la transmet vers son CH. Pour assurer cette transmission, la valeur de l'attribut détectée doit être supérieure au seuil dur et doit être différente de la valeur sauvegardée dans la variable VD d'une valeur égale ou supérieure au seuil flexible. Étant donné que la transmission consomme plus d'énergie que la détection, ce protocole s'avère intéressant car il permet la réduction du nombre de transmission et donc la consommation d'énergie. Or, la mise en œuvre de TEEN ne peut s'adapter pour des applications dont les informations sont récoltées de manière périodique. Pour ce faire, le protocole APTEEN qui est hybride combinant à la fois les politiques de routage proactives et réactives, a été proposé. Il permet de modifier les valeurs de la périodicité ou des seuils utilisées dans le protocole TEEN en fonction des besoins de l'utilisateur et du type d'application. Comme l'illustre la figure 3.6 b, la station de base constitue les CHs qui diffusent à leur tour non seulement les attributs, les seuils dur et flexible comme dans le cas du protocole TEEN mais ils envoient aussi le délai ou calendrier des transmissions. Ainsi, l'envoi périodique d'informations détectées par chaque nœud capteur est assuré. Ce qui peut être considéré aussi comme un inconvénient pouvant alourdir les traitements.

Le protocole APTEEN offre une plus grande flexibilité à l'utilisateur pour ajuster à la fois le calendrier des transmissions mais aussi les valeurs de seuil pour la consommation d'énergie mais

¹⁶ Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

¹⁷ Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

comparativement au protocole TEEN, il donne un rendement énergétique très en-dessous puisqu'il ne diminue pas le nombre de transmissions.

Un autre protocole SOP¹⁸ disposant de capacité d'auto-organisation a été développé pour des architectures hétérogènes comportant des nœuds capteurs stationnaires et/ou mobiles [109]. Ces deniers, sondent l'environnement, puis transmettent les données via d'autres nœuds fixes agissant en tant que routeurs vers la station de base. Chaque nœud souhaitant faire partie du réseau doit être en mesure d'atteindre un routeur quelconque, ce qui permet de les identifier vu qu'ils utilisent l'adressage des routeurs en question.

Le protocole SOP utilise un algorithme basé sur la mise en œuvre de boucles locales de Markov pour une prospection aléatoire de possibles défaillances dans les différentes branches appartenant aux différents arbres du graphe générant de fait des coûts pour maintenir les tables de routage et garantir la hiérarchie. Comparativement au protocole SPIN, SOP consomme moins d'énergie lors de la diffusion des messages.

Le protocole PEGASIS¹⁹ est un autre type de protocole qui utilise des architectures hiérarchisées et qui apporte des améliorations par rapport à LEACH en organisant l'ensemble des nœuds en chaînes et qui s'alternent en tête de ces chaînes afin de communiquer avec la station de base [12][110]. Cela permet de distribuer équitablement l'énergie dépensée sur l'ensemble du réseau. L'idée étant de positionner aléatoirement dans l'environnement des nœuds qui à leur tour constitueraient une chaîne en se basant sur un algorithme de recherche des plus proches voisins. La station de base calcule la chaîne puis la diffuse sur l'ensemble des nœuds du réseau. Pour la construction de la chaîne, l'algorithme considère dans un premier temps le nœud capteur le plus éloigné de la station de base afin de s'assurer de la connectivité. Comme l'illustre l'exemple de la figure 3.7 (a), le nœud 0 est connecté au nœud 3 qui à son tour est connecté au nœud 2 via le nœud 1. Quand un nœud disparaît, la chaîne se reconstruit de la même manière afin d'éviter la zone morte. Cette capacité de reconfiguration de chaîne confère au protocole une robustesse et une tolérance aux pannes.

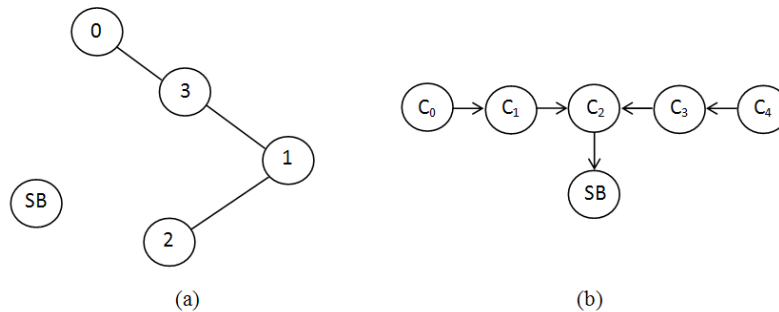


Figure 3.7 Algorithme de (a) construction de chaîne (b) passage de jeton

Pendant chaque cycle, les données sont collectées par un nœud quelconque de la chaîne puis transmises vers le nœud voisin qui les fusionne à son tour avec ses propres données pour les transmettre à son voisin dans la chaîne. Le chef de file de la chaîne initie la transmission en utilisant un algorithme de contrôle par passage de jeton depuis le nœud se trouvant à l'extrémité de la chaîne. Le coût de la mise en œuvre de cet algorithme est très faible étant donné que la taille du jeton utilisé est minime.

Dans l'exemple de la figure 3.7 (b), le processus fonctionne de la manière suivante : un jeton part dans un premier temps à partir d'un nœud leader C_2 tout au long de la chaîne jusqu'à atteindre le nœud C_0 qui transmettra ses données via C_1 puis C_2 . Dans un second temps, une fois les données reçues de C_1 , C_2 transmet un jeton vers C_4 pour lui transmettre à son tour ses données via C_3 . Chaque nœud fusionne les données perçues avec ses propres données puis génère un seul paquet de données toujours de la

¹⁸ Self Organizing Protocol

¹⁹ Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems

même taille et le transmet à son voisin. Ainsi, C_0 transmet ses données vers C_1 qu'il fusionne avec ses propres données puis les achemine à son tour vers le leader. De la même manière, une fois que C_2 passe son jeton à C_4 , ce dernier transmet ses données à C_3 qu'il fusionne à son tour avec ses propres données puis les transmet vers le leader. Le nœud C_2 se met en attente de données pour réaliser une agrégation de l'ensemble des données reçues puis les acheminer finalement vers la station de base.

Il est à noter que lors de la construction de chaîne, les nœuds se trouvant éloignés dissipent plus d'énergie que ceux qui sont proches l'un de l'autre. L'idéal est que ces nœuds ne soient pas choisis en tant que leader ce qui accélérerait leur disparition du réseau. Le choix du leader doit s'effectuer par l'introduction d'une valeur seuil sur la distance entre nœuds voisins. Le seuil doit être adaptatif aussi avec le niveau énergétique.

Si des nœuds arrivaient à disparaître du réseau, la chaîne sera reconstruite et la valeur du seuil sera réévaluée pour déterminer le nouveau nœud leader. Comparativement à LEACH, PEGASIS offre de meilleurs résultats en termes de consommation d'énergie du principalement aux courtes distances entre les nœuds. Le protocole suppose que tous les nœuds sont capables de communiquer directement avec la station de base, ce qui est loin de la réalité pour des RCSF dense où la communication, comme dans le cas de LEACH, est réalisé en mode multi-sauts. La chaîne peut être très longue pouvant induire des retards excessifs pour la transmission des données particulièrement pour les nœuds éloignés de la station de base et la présence d'un leader unique peut être aussi un obstacle. Plus récemment, des travaux ont été entrepris pour améliorer les performances de PEGASIS [111-113]. H-PEGASIS²⁰ a été proposée dans laquelle des transmissions simultanées de données sont effectuées de manière à éviter les collisions en utilisant des approches incorporant le codage des signaux et les transmissions spatiales [106]. Le protocole construit une chaîne de nœuds formant un arbre hiérarchisé dans lequel chaque nœud à un niveau particulier de la chaîne transmet directement les données vers le nœud se trouvant au niveau supérieur de la hiérarchie. Cette méthode permet une transmission parallèle et réduit donc significativement les retards.

Le protocole HEED²¹ est une extension du protocole LEACH par l'introduction d'une nouvelle métrique telle que l'énergie résiduelle, la densité ou le degré d'un nœud capteur pour la sélection des clusters [114]. Le protocole opère dans des réseaux multi-sauts en adaptant la puissance de transmission dans le cas des communications inter-clusters.

L'algorithme sélectionne périodiquement des CHs selon deux paramètres de classification : l'énergie résiduelle des nœuds pour le calcul de la probabilité de sélection des CHs, et le coût de la communication intra-clusters comme fonction de densité de cluster ou degré d'un nœud.

Le protocole commence par une phase d'initialisation où une probabilité de sélection d'un nœud capteur en tant que CH est calculée :

$$CH_{prob} = C_{prob} \cdot \frac{E_r^{(i)}}{E_{Tot}} \quad (3.2)$$

Les paramètres $E_r^{(i)}$, E_{Tot} et C_{prob} étant respectivement l'énergie résiduelle d'un nœud i , l'énergie totale du réseau et le nombre optimal de clusters.

Ce protocole offre des performances meilleures que celles de LEACH en termes de prolongation de la durée de vie du réseau car la sélection des CHs ne s'effectue pas de façon aléatoire ce qui provoquerait dans plusieurs cas une disparition rapides de nœuds mal choisis pour être CH. Toutefois, la sélection des clusters ne porte que sur un sous-ensemble de paramètres, pouvant éventuellement imposer des contraintes sur le système.

Dans le protocole FEED²² [115], le réseau est structuré en clusters dont lesquels on peut distinguer des nœuds capteurs ordinaires ou normaux, des CHs qui assurent la coordination des communications

²⁰ Hierarchical-PEGASIS

²¹ Hybrid, Energy-Efficient Distributed Clustering

²² Fault tolerant, Energy Efficient, Distributed Clustering

intra-cluster et inter-clusters, des CHs pivots (PCH) ayant des capacités supplémentaires à celles des nœuds CHs, et des nœuds superviseurs (SN). Ces derniers, comme leur nom l'indique, assurent la supervision des clusters associés pouvant se substituer aux nœuds CHs et/ou PCH en cas de pannes. Les nœuds PCH couvrent des zones très importantes sur le réseau et sont généralement très utilisés pour jouer le rôle de routeurs.

Comme dans la plupart des protocoles, le facteur énergie est primordial, un nœud souhaitant devenir CH doit disposer d'une énergie lui permettant d'être opérationnel pour assurer les traitements et les communications et être volontaire. Par ailleurs, les nœuds embarquent un système GPS qui leur permet de se localiser et de connaître leurs coordonnées géographiques dans le réseau. La mise en œuvre passe par plusieurs phases. Dans un premier temps, tous les nœuds doivent calculer leurs facteurs de densité. Pour ce faire, ils diffusent leurs ID et coordonnées géographiques aux nœuds voisins, à la réception chaque nœud calcule les distances le séparant des nœuds voisins. Si les distances calculées sont inférieures à une distance seuil, le nœud en question diminue son facteur de densité. Si la densité calculée est supérieure à la valeur seuil et que le nœud se trouve en dehors des bordures, le facteur centralité est déterminé pour établir si le nœud peut être volontaire ou non. Plus le facteur de centralité est petit plus les conditions sont réunies pour établir un CH. L'idéal est que sa valeur soit nulle, i.e., le nœud est exactement au centre de ses voisins. Pendant l'établissement de la centralité, chaque nœud calcul une fonction score Sc , tel que :

$$Sc = a \cdot E_n + b \cdot D_e + c \cdot C_e \quad (3.3)$$

Où a , b et c étant des coefficients, E_n , D_e et C_e représentent respectivement et l'énergie résiduelle, le facteur densité et centralité.

Une fois la centralité est calculée, chaque nœud volontaire envoie un message de type :

$$Sc_local_broadcast_msg[myNodeID, C_e, Sc]$$

Puis recalcule une seconde fonction correspondant au score final, telle que :

$$Zc = d \cdot Sc - e \cdot Dist \quad (3.4)$$

Avec d et e respectivement des coefficients de pondération de la fonction Sc et de la distance.

Chaque nœud donne un score négatif au facteur de distance pour contraindre les nœuds les plus éloignés à devenir des CH. Chaque nœud sélectionne un nœud volontaire voisin ayant le meilleur score Zc comme volontaire secondaire et met au courant ses voisins. Si un volontaire est sélectionné par plusieurs nœuds comme volontaire secondaire, il disposera alors d'une plus grande probabilité d'être sélectionné comme CH, PCH ou SN (Figure-3.8).

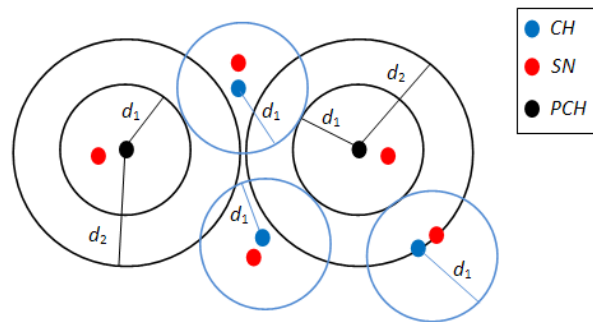


Figure 3.8 Localisation des nœuds CH, PCH et SN dans le réseau

Pour ce faire, les règles définies en (3.5) doivent être vérifiées :

$$\begin{cases} d_1 \leq d_2 \leq \frac{2}{3} \cdot d_1 \\ \text{Min}_{\text{distance}(PCH_i, PCH_j)} \geq d_2 \\ \text{Min}_{\text{distance}(CH_i, CH_j)} \geq d_1 \\ \text{Min}_{\text{distance}(PCH_i, CH_i)} \geq d_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Des résultats de simulation montrent que l'utilisation du protocole FEED permet une amélioration significative de la classification en particulier pour prolonger la durée de vie du réseau en comparaison avec LEACH et HEED.

1.3 Routage basé sur la localisation

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont identifiés par leurs emplacements dans le réseau. Les distances entre nœuds voisins peuvent être estimées de deux façons : soit par échange d'informations type RSSI et utilisation de modèles empiriques composés de paramètres environnementaux et énergétiques [107][116-117], soit directement par l'utilisation de système satellitaire si les capteurs embarquent des récepteurs à faible puissance type GPS [118].

Des phases dites active ou sommeil sont adoptées par l'ensemble des nœuds capteurs en fonction de leurs activités opérationnelles dans le réseau.

Destiné initialement pour les réseaux mobiles et Adhoc, le protocole GAF²³ permet d'optimiser la consommation énergétique avec un niveau acceptable sur la qualité de service (perte de paquets, latence des messages) [118]. La zone de détection est divisée en petites grilles virtuelles adjacentes et équivalentes dont lesquelles un seul nœud, (i.e., leader), peut être activé un instant donné. Cela passe par une coordination et une diffusion de messages sur l'ensemble des nœuds de chaque grille afin de sélectionner pour un intervalle de temps déterminé ceux d'entre eux devant être activés ou désactivés (mode sommeil). Périodiquement, le leader rediffuse un message de découverte afin de permettre à d'autres nœuds de la grille d'être activés à leur tour. Comme l'illustre la figure 3.9, le diagramme de transition d'état montre trois états associés à un nœud capteur : recherche-découverte, actif, et sommeil. Lorsqu'un nœud se met en état de sommeil, il éteint sa radio pour économiser son énergie. Dans l'état recherche-découverte, un échange de messages de découverte entre nœuds capteurs de la même grille est réalisé pour se renseigner ses voisins. Ces messages de découvertes sont aussi diffusés périodiquement lorsque le nœud est en activité afin d'informer les autres capteurs de son état. Le temps passé dans chacun de ces États peut être ajusté par l'application en fonction des besoins et de la mobilité du capteur.

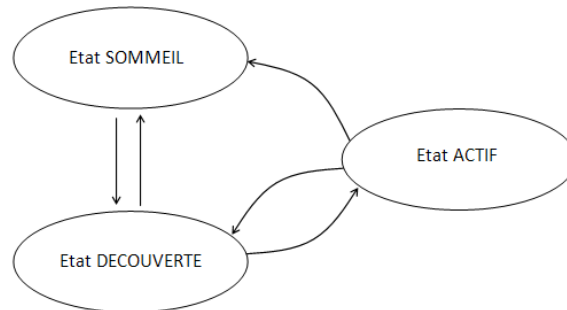


Figure 3.9 Diagramme de transition d'états

²³ Geographical Adaptive Fidelity

Bien qu'il soit basé sur la localisation, GAF peut également être considéré comme un protocole hiérarchique, où les clusters se constituent à partir d'une localisation géographique. Pour chaque zone d'une grille particulière, un nœud capteur représentatif agit en tant que leader pour assurer la transmission des données vers d'autres nœuds. En revanche, le nœud leader ne peut assurer comme dans le cas des protocoles hiérarchiques, les fonctions d'agrégation et de fusion de données. Des résultats de simulation ont montrés que GAF est performant en termes de latence, perte de paquets et prolonge la durée de vie du réseau en optimisant l'énergie. En revanche, le réseau peut se retrouver sous-exploité dans sa totalité vu que le protocole se base sur la communication entre grilles adjacentes exploitant à moitié la portée radio.

Toujours dans la même famille de protocoles qui exploite la position des nœuds capteurs, dans GeRaF²⁴ [29-31] les nœuds se mettent dans un premier temps en mode écoute puis évoluent périodiquement selon des cycles de fonctionnement alternant entre des phases de réveil et de sommeil. Dès qu'un nœud souhaite transférer des données, il passe en mode réveil et diffuse un paquet contenant son propre emplacement et celui du destinataire. Ce dernier lui répond par un message d'acquiescement afin d'enclencher la transmission. La zone proche du destinataire est divisée en régions avec chacune sa propre priorité. Plus la région est proche de la destination, plus sa priorité est élevée. Après diffusion des paquets, les régions dont les nœuds sont très proches de la destination sont sollicitées pour le transfert et le relaiage de l'information. Si l'ensemble des nœuds d'une région sont en mode sommeil, une tentative de transit par une autre région dont la priorité est élevée, est effectuée, et ainsi de suite.

Le protocole GEAR²⁵ développé dans [119] exploite les informations géographiques à partir de la diffusion de requêtes sur des régions appropriées étant donné que les requêtes disposent d'attributs géographiques. Afin d'assurer l'acheminement de l'information, le protocole se base sur des heuristiques pour la sélection des nœuds voisins à partir d'information géographiques et des niveaux énergétiques associés. Le principe étant de limiter les zones de recherche lors de la diffusion des intérêts, comme dans le cas de la diffusion dirigée, ce qui permet une meilleure conservation d'énergie. Chaque nœud capteur sauvegarde le coût estimé qui combine l'énergie résiduelle et la distance séparant le nœud en question de la cible, et le coût lié à l'apprentissage des chemins pour atteindre la destination à travers les voisins. Le coût d'apprentissage correspond à l'amélioration du coût estimé pour le routage autour d'un nœud isolé ou trou ne disposant pas assez de voisins proches lui permettant d'atteindre la région cible. S'il n'y a pas de trous, le coût estimé sera identique au coût d'apprentissage. Ce dernier se rétropropage en un seul saut à chaque fois qu'un paquet atteint la destination afin que la configuration du chemin lors de l'envoi du prochain paquet soit adapté.

La mise en œuvre de l'algorithme passe par une phase de transmission des paquets d'informations vers la région cible et une phase de transmission dans la région elle-même. Dans la première phase, lors de la réception d'un paquet, un nœud capteur vérifie l'ensemble de ses nœuds voisins pour localiser le nœud le plus proche de la région ciblée. S'il en existe un, alors il sera choisi pour le saut suivant et ainsi de suite jusqu'à atteindre un nœud de la région ciblée. Si tous les nœuds voisins sont éloignés de la région, alors le nœud lui-même se retrouve isolé et donc la présence d'un trou. Dans ce cas, en se basant sur la fonction coût d'apprentissage, un nœud voisin est sélectionné pour relayer les informations vers la région ciblée. Ainsi, la sélection sera mise à jour en fonction de la convergence de la fonction coût d'apprentissage lors de l'acheminement des paquets. Dans la seconde phase, la transmission concerne la région cible elle-même. Une fois la région cible atteinte, les paquets d'informations seront diffusés soit par un transfert géographique récursif ou par inondation restrictive qui est intéressante dans le cas d'un déploiement très restreint. Dans le cas des réseaux très denses, la diffusion géographique récursive permet une meilleure optimisation énergétique que l'inondation restrictive. La région est divisée en quatre sous-régions et quatre copies d'un même paquet

²⁴ Geographic Random Forwarding

²⁵ Geographic and Energy Aware Routing

d'informations sont créées. Ce processus de fractionnement et de transmission se poursuit jusqu'à atteindre des régions disposant que d'un seul nœud.

Comparativement à GPSR²⁶ [120], qui est l'un des premiers protocoles proposé pour solutionner la problématique des nœuds isolés en utilisant le concept de graphes à deux dimensions, le protocole GEAR réduit non seulement la consommation énergétique lors de la configuration des chemins mais assurent aussi un meilleure taux de livraison des paquets de données.

Contrairement au protocole GAF, GEAR ne peut assurer la fonction d'agrégation ou de fusion de données et souvent la scalabilité n'est pas assurée lors de la transmission des paquets [121]. La mise en œuvre du mécanisme de routage surcharge souvent le réseau et donc influe directement sur l'efficacité énergétique. Une différence majeure entre les deux protocoles concerne l'utilisation de modèle de délivrance des données. Le protocole GAF suit un modèle de délivrance des données sur la base de grille virtuelle avec une transmission maître-esclave, alors que dans GEAR, le modèle est basé sur le principe de la demande d'envoi d'informations. Concernant la qualité de service, aucun des deux protocoles ne la prend en compte.

Conçu dans un premier temps pour les réseaux MANET, le protocole SPAN assure une meilleure coordination entre nœuds capteurs pour l'optimisation d'énergie [122]. Il réalise une sélection de nœuds coordinateurs en fonction de leurs positions dans le réseau afin de constituer un sous-réseau principal pour l'acheminement des données. Le choix d'un nœud coordinateur est réalisé si deux voisins d'un nœud non-coordinateur ne peuvent communiquer directement ou par l'intermédiaire d'un ou deux nœuds coordinateurs. L'exemple illustré dans la figure 3.10 montre un squelette d'un réseau complètement connecté dans lequel un ensemble de nœuds coordinateurs sont formés afin de faciliter l'acheminement des données. Les paquets se trouvant entre les nœuds 3 et 4 doivent lutter pour utiliser la bande passante avec ceux se trouvant entre les nœuds 1 et 2. Par ailleurs, si le nœud 5 agissait en tant que coordinateur, il n'y aura aucun conflit.

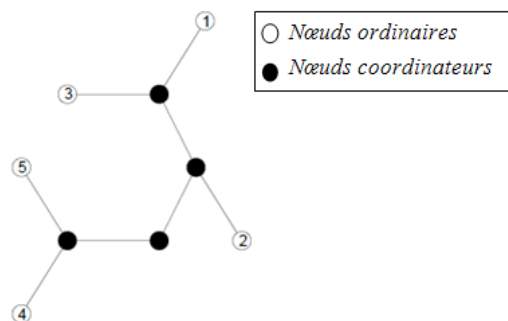


Figure 3.10 Formation de nœuds coordinateurs

Combiné avec un protocole de transmission géographique, la règle de l'élection dans le protocole SPAN impose à chaque nœud capteur d'annoncer son statut à ses voisins, i.e., coordinateurs ou non-coordinateurs. En outre, lorsqu'il reçoit un paquet, un nœud coordinateur retransmet le cas échéant, le paquet à un autre nœud coordinateur voisin ou non-coordinateur, plus proche de la destination.

Le protocole TBF²⁷ mis en œuvre dans le cadre des réseaux denses nécessite aussi l'utilisation d'un système de coordonnées GPS afin que les nœuds capteurs se positionnent dans l'environnement et calculent les distances les séparant des nœuds voisins [123]. La source spécifie dans les paquets envoyés la trajectoire à suivre mais n'indique pas explicitement le chemin saut-par-saut. En se basant sur les informations de localisation des nœuds voisins, le nœud capteur émetteur de paquets de données décide du prochain saut à effectuer, celui-ci doit être le plus proche possible de la trajectoire

²⁶ Greedy Perimeter Stateless Routing²⁷ Trajectory-Based Forwarding

définie par la source. Afin d'augmenter la fiabilité et la capacité du réseau, il est possible de mettre en œuvre un routage multi-chemins dans lequel une trajectoire alternative peut être utilisée. Le protocole peut implémenter plusieurs fonctionnalités telles que l'inondation, la découverte de chemins et la gestion du réseau.

Dans la même famille que TBF, un autre protocole MECN²⁸ auto-reconfigurable permet d'assurer la connectivité du réseau quelque soit le type de capteur utilisé, statiques ou mobiles [124]. Il permet de concevoir une topologie à énergie minimale en construisant des arbres optimaux sous forme de chaînes à destination du nœud puits. Cette conception se base sur les positions des nœuds dans l'environnement opérationnel et se traduit par la mise en œuvre de deux phases, à savoir, la construction de graphe et la de distribution des coûts. Bien que le protocole soit auto-reconfigurable, et donc tolérant aux défaillances et aux pannes (cas de réseaux mobiles), il souffre de problème d'épuisement de batterie lorsqu'il s'agit d'applications type réseau de capteurs. Il ne prend pas en considération l'énergie résiduelle au niveau de chaque nœud capteur et donc, les coûts des liens sont toujours statiques conduisant les nœuds à disparaître rapidement du réseau créant ainsi des discontinuités au niveau de la chaîne de routage. Pour y remédier, il serait intéressant d'adapter dynamiquement la topologie à puissance minimale en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds.

Une version améliorée du protocole MECN a été proposée dans [125]. Il s'agit du protocole SMECN²⁹ dans lequel un graphe minimal est caractérisé en fonction de l'énergie minimale. En d'autres termes, pour chaque paire de capteurs d'un graphe, il existe un chemin minimal présentant des coûts très faibles en termes de consommation énergétique sur l'ensemble des chemins possibles. Chaque nœud découvre ses voisins immédiats en diffusant un message de découverte de voisins en utilisant une puissance initiale. Il vérifie ensuite si l'ensemble défini théoriquement de voisins immédiats correspond à un sous-ensemble d'un ensemble de capteurs ayant répondu à ce message de découverte. Si c'est le cas, le nœud capteur utilisera sa puissance initiale pour transmettre son message si non, il incrémente cette puissance et retransmet son message de découverte à son voisin.

D'autres protocoles de routage appartenant à la famille des protocoles basés sur la localisation ont été proposés. On peut citer par exemple GOAFR³⁰, GEDIR³¹ et MFR³² [126-127].

2. Routage basé sur le fonctionnement du protocole

Dans cette famille de protocoles, la mise en œuvre dépend fortement des types d'applications. Parmi les techniques utilisées, on peut citer la négociation, l'établissement de requêtes, la vérification de la cohérence des données, la diffusion multi-chemins et enfin la qualité de service QoS.

2.1 Routage multi-chemins

La tolérance aux pannes est une caractéristique principale qu'un protocole de routage doit disposer afin d'assurer la continuité de fonctionnement du réseau. Une rupture de chemin suite à un dysfonctionnement capteur, i.e., défaillance physique ou manque d'énergie, ne doit en aucun cas causer un problème de transmission depuis la source jusqu'à la destination. Les protocoles de communication basés sur un routage multi-chemins peuvent y remédier en proposant des voies alternatives afin d'améliorer les performances du réseau en termes de robustesse, de surcharges et de longévité. La maintenance de l'ensemble des chemins alternatifs est plus qu'importante et est assurée par un contrôle périodique par acheminement des messages dits de contrôle.

Plusieurs travaux utilisant divers critères tels que l'énergie résiduelle ont été proposés et développés dans ce sens. Dans [128], un protocole est mis en œuvre pour sélectionner la meilleure branche d'un arbre qu'une information peut emprunter tout en tenant compte de la valeur du seuil énergétique

²⁸ Minimum Energy Communication Network

²⁹ Small Minimum-Energy Communication Network

³⁰ Greedy Other Adaptive Face Routing

³¹ Geographic Distance Routing

³² Most Forward within Radius

préétabli d'avance. En utilisant ce principe, les ressources énergétiques des nœuds appartenant à d'autres branches initiales ne s'épuiseront pas de sitôt. Cependant, dans ce type de méthodes, les coûts liés au changement d'itinéraire durant la transmission, ne peuvent être quantifiés.

Dans [129] un algorithme calcule de manière aléatoire un ensemble de chemins sous-optimaux selon une probabilité dépendante de l'évolution de la consommation énergétique au niveau de chaque branche. Sachant qu'une branche avec une énergie résiduelle importante, peut aussi consommer plus d'énergie pour router l'information, il doit y avoir donc un compromis entre la minimisation de la consommation et l'énergie résiduelle. Pour ce faire, une procédure de routage permettant de switcher entre les différentes branches d'un arbre peut être intéressante. C'est le cas du protocole qui a été proposé dans [130]. Lorsque l'énergie résiduelle le long d'une branche atteint un seuil minimal, l'algorithme réoriente l'acheminement de l'information sur une autre branche plus économe en énergie. Dans [131], l'algorithme permet d'améliorer la fiabilité des réseaux particulièrement ceux déployés dans des environnements hostiles par propagation de l'information à travers plusieurs branches afin d'accroître la probabilité d'acheminement et de livraison des données. Cependant, le trafic peut augmenter de manière significative provoquant une surcharge du réseau et donc nécessite un compromis entre la densité du trafic et la fiabilité du réseau. Pour ce faire, une fonction de redondance dépendante du degré de propagation de l'information et de la probabilité d'échec de l'acheminement sur des chemins disponibles a été proposée. L'idée est de structurer les paquets de données d'origine en un ensemble de sous-paquets devant être transmis par plusieurs chemins différents. C'est un concept intéressant car même si certains sous-paquets se perdent, le message original peut toujours être reconstruit au niveau de la cible. Le protocole basé sur la diffusion dirigée [88] semble aussi être un bon candidat pour le routage multi-chemins robuste.

2.2 Routage par requêtes

Comme dans le cas de la diffusion dirigée [88], les nœuds destinataires propagent une requête écrite en langage naturel haut niveau dans le réseau à la recherche d'une donnée, i.e., cas d'une tâche de détection. Le nœud disposant de l'information relative à la requête renvoie le paquet d'information vers le nœud initiant la requête. La station de base propage des messages d'intérêts à travers tout le réseau, puis des gradients du nœud source vers la station de base sont établis. Une fois que la source dispose des données avec un intérêt spécifique, elle renvoie ses données le long du chemin correspondant au gradient d'intérêt en réalisant une agrégation des données, i.e., suppression des redondances. Cela permettrait une optimisation d'énergie.

Dans ce type de routage, le protocole de routage RR [97] est un parfait exemple, il utilise un ensemble d'agents vivants pour créer des chemins ciblant des événements rencontrés. Chaque agent dispose d'une durée de vie lui permettant d'assurer un certain nombre de sauts, puis disparaît du réseau. A Chaque fois qu'il rencontre un nouvel événement il crée un état sur le chemin entrepris en enregistrant à la fois l'événement et l'itinéraire parcouru pouvant conduire à l'événement le cas échéant. Lorsque les agents empruntent des chemins très courts, ils mettent à jour et adaptent en conséquence leur table de routage en ré-optimisant les trajets et d'autres événements s'ils existent. Chaque nœud peut également générer un agent de manière probabiliste qui comporte une table d'événements synchronisée avec un autre nœud capteur qu'il rencontre. Dans ce routage RR, un nœud ne peut générer une requête que s'il a appris le chemin indispensable pour atteindre l'événement. Si aucun chemin n'est disponible, il transmet une requête de manière aléatoire puis se met en état d'attente de la réponse pendant un laps de temps, après lequel le nœud inonde le réseau si aucune réponse n'est reçue de la destination.

2.3 Routage basé sur la négociation

Ce type de routage a été développé pour remédier aux phénomènes d'implosion et de chevauchement entre les données lors de l'inondation du réseau par des messages. Chaque nœud peut

recevoir plusieurs copies d'un même message et donc susceptible de consommer beaucoup d'énergie pendant la transmission et les traitements. Par conséquent, l'idée principale de la négociation dans les RCSF est d'utiliser des descripteurs de données de haut niveau afin de supprimer la duplication des informations et d'éviter la redondance des données. Le principe de fonctionnement de la négociation se base sur l'utilisation de trois types de messages. Un message REQ envoyé par un nœud capteur souhaitant recevoir des données. Des messages DATA contenant des données avec un entête métadonnées. Lorsqu'un nœud dispose de données à partager dans le réseau, il fait une annonce en transmettant un message ADV. Les messages ADV et REQ sont de tailles plus réduites que les messages DATA, et ne contiennent que des métadonnées. Cela s'explique que dans un réseau où le coût de la transmission et réception des messages est largement déterminé par la taille du message, les messages ADV et REQ consomment moins d'énergie que DATA.

Les protocoles SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-BC et SPIN-RL font partie de la famille SPIN dans laquelle le routage se base sur la négociation [90-91]. Les protocoles SPIN-PP et SPIN-EC sont destinés pour des réseaux point-à-point pour lesquels les paquets de données ne sont jamais supprimés et que les retards dus à la congestion des nœuds capteurs ne se produisent jamais. Quand SPIN-BC et SPIN-RL, ils sont associés pour des réseaux qui se basent sur la diffusion.

2.4 Routage basé sur la QoS

La mise en œuvre d'un protocole de routage basé sur une QoS, passe par la prise en compte de critères ou métriques telles que, l'énergie, la latence, la bande passante, etc. SAR³³ étant l'un des premiers protocoles de routage prenant en compte la QoS [12]. Comme métrique, ce protocole se base sur l'énergie consommée, la QoS sur chaque chemin et le niveau de priorité des paquets. Il implémente une approche multi-chemins avec des méthodes de restauration de chemins ciblés afin d'éviter des itinéraires faillibles, donc d'être tolérant aux fautes.

La création de chemins multiples à partir d'un nœud source passe par la construction d'un arbre de routage de la source vers différentes destinations. Une fois le processus achevé, chaque nœud devient partie prenante dans la structure de l'arbre ayant été construit. Il calcule une métrique moyenne pondérée de la QoS représentée par la somme des métriques chacune pondérée par un coefficient associé à chaque niveau de priorité du paquet à acheminer. La présence de possibles défaillances pouvant entraîner un changement de topologie est pris en compte directement par le recalcul de nouveaux chemins nécessitant une réadaptation des différentes tables de routage et des états de chaque nœud. Cette réadaptation peut causer des soucis de consommation d'énergie dus à la surcharge particulièrement pour les réseaux denses.

On peut distinguer aussi dans la même famille, un autre protocole SPEED dans lequel chaque nœud doit disposer d'informations sur ses voisins permet de garantir bout en bout et en temps réel les performances du réseau [132]. Chaque paquet transféré à une vitesse donnée, permet à une application donnée, d'estimer les délais d'acheminement bout-en-bout en divisant la distance source-station de base par la vitesse préétablie. Par ailleurs, SPEED permet d'éviter la congestion du réseau en se basant sur des messages informatifs envoyés par les nœuds congestionnés vers les nœuds prédécesseurs afin de sélectionner des chemins alternatifs. Pour ce faire, il intègre un module de routage SGNFG³⁴ qui estime les délais au niveau de chaque nœud en calculant le temps écoulé suite à la réception d'un message d'acquittement ACK d'un nœud voisin comme réponse à un paquet de données transmis. Une comparaison sur les différents délais permet de sélectionner le nœud dont les exigences en vitesse de transmission des paquets sont satisfaites.

Comparé aux protocoles DSR³⁵ et AODV³⁶, le protocole SPEED présente de meilleures garanties en termes de délais d'acheminement et de taux de perte. L'énergie consommée lors des transmissions des

³³ Sequential Assignment Routing

³⁴ Stateless Geographic Non-Deterministic forwarding

³⁵ Dynamic Source Routing

³⁶ Ad-hoc On-Demand Vector

messages est moindre vu la simplicité du protocole. Cependant, SPEED ne prend pas en considération d'autres métriques énergétiques dans le processus de routage et par conséquent, il est très difficile de faire une comparaison réaliste avec d'autres types de protocoles. Des vides dus par exemple à la défaillance de plusieurs nœuds dans une zone géographique quelconque ne sont pas considérés en tant que tels, mais en tant que phénomènes temporaires de congestion.

2.5 Routage basé sur la cohérence des données

En général, dans un RCSF, les nœuds réalisent des traitements et communiquent entre eux des informations qui peuvent être de différents types conduisant le processus de routage à tenir compte à la fois de la cohérence ou de la non-cohérence des données [12]. Dans le cas des données cohérentes, le paquet de données est acheminé aux nœuds agrégateurs une fois que les traitements sont établis tels que la suppression des redondances. C'est un routage efficace en termes d'optimisation d'énergie.

En revanche, dans le cas des données non-cohérentes, les nœuds traitent localement des données brutes avant d'être acheminées vers d'autres nœuds pour un traitement ultérieur, i.e., agrégation. Ainsi, les traitements passent par trois phases. Une première phase de détection de la cible, de collecte des données et de prétraitements. Lorsqu'un nœud souhaite coopérer, il rentre dans une seconde phase dite de déclaration d'appartenance, où il déclare son intention à ses voisins. Cela doit être effectué le plutôt possible de telle sorte que chaque nœud ait une connaissance locale sur le voisinage et la topologie du réseau. Dans la troisième phase, un nœud central doit être élu afin de réaliser des traitements plus performants et pour ce faire, il doit disposer d'une énergie suffisante et des capacités de calcul très importantes.

3.3 Analyse critique

Dans ce chapitre, on a montré brièvement les enjeux et les challenges des applications type RCSF, puis nous avons exploré l'ensemble des techniques de routage développées ces dernières années en attirant l'attention sur les facteurs améliorant et/ou dégradant les performances et le fonctionnement des réseaux.

Augmenter les performances d'un RCSF en termes de longévité, de connectivité et de robustesse passe par la prise en compte de facteurs primordiaux tels que l'énergie consommée et les ressources calculatoires et de mémorisation. Il est donc nécessaire de trouver des alternatives surtout logicielle étant donné qu'un réseau une fois déployé ne peut tolérer des interventions humaines répétitives à chaque dysfonctionnement quel qu'il soit, i.e., panne batterie, influence environnementale, etc. Par ailleurs, ces dysfonctionnements peuvent provoquer des changements topologiques significatifs nécessitant une réorganisation complète du réseau afin d'assurer les échanges et le réacheminement des données. Proposer des solutions adéquates et soft orientées routage peut apporter des avancées significatives pour améliorer la fluidité des échanges d'informations en tenant compte des changements de la topologie et stabiliser le fonctionnement du réseau dans le temps en exploitant de manière optimale la consommation énergétique. Un routage centré données destiné principalement pour des réseaux à topologie plate et qui se caractérise par une grande tolérance aux pannes lors de la construction des chemins avec des coûts de maintenance très bas peut être considéré comme une solution. Néanmoins, il utilise un nombre important de messages de contrôle afin d'assurer le bon fonctionnement du réseau sans pour autant améliorer la scalabilité et donc dégrader dans certains cas les performances. Par ailleurs, les nœuds localisés à proximité de la station de base, sont souvent sollicités et leur perte accélérée peut conduire à une surconsommation d'énergie atténuant de fait la durée de vie du réseau. En revanche, le routage hiérarchique connu pour les avantages qu'il présente aux niveaux de la scalabilité et l'efficacité des transmissions peut apporter des solutions d'un point de vue optimisation de la consommation énergétique particulièrement pour les réseaux denses hétérogènes. Lors de la phase de déploiement, des nœuds Cluster-Head (CH) plus puissants en termes d'énergie, de bande passante et de mémoire et fonctionnant différemment des nœuds ordinaires, sont

formés puis sélectionner. Ils permettent d'optimiser le nombre de messages à acheminer vers la cible par des opérations d'agrégation de données issues de sources différentes, réduisant de fait considérablement la consommation énergétique. Le routage à base de la localisation identifie l'emplacement des nœuds dans le réseau par estimation des distances entre nœuds voisins soit, par échange d'informations type RSSI et utilisation de modèles empiriques composés de paramètres environnementaux et énergétiques ou directement par système satellitaire et dans ce cas, les capteurs embarquent des récepteurs à faible puissance type GPS.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'un protocole de routage doit nécessairement prendre en compte et d'optimiser si possible l'ensemble des sources de consommation d'énergie qui sont multiples et qui ne se résument pas uniquement à l'émission et la réception des données [133]. Parmi ces sources, on peut citer les traitements réalisés par le processeur, la détection de l'information environnementale, les transitions entre les différents états possibles d'un capteur comme la mise en veille et le réveil, la lecture et écriture mémoire, les actionneurs et bien sûr la formation des clusters dans le cas des architectures hiérarchisées. Chacune de ces sources consomme à elle seule une certaine quantité énergétique différentes des autres, les pourcentages des pertes énergétiques pour un RCSF à 100 nœuds illustrée dans figure 3.11 attestent de cela. Effectivement, on remarque bien que plus de 50% de pertes énergétiques sont le résultat de la radio c'est dire, l'émission et la réception des données. Plus les distances sont considérables plus l'énergie nécessaire pour l'acheminement de l'information doit être importante. En fonction des applications RCSF, les sources énergétiques peuvent plus ou moins être prises en compte ou pas. A titre d'exemple, une application de surveillance des feux de forêts ne considérerait pas l'énergie due aux actionneurs ou éventuellement celle due à la sauvegarde ou mémorisation des données et dans ce cas, plus de 70% de l'énergie consommée relèverait de la transmission radio.

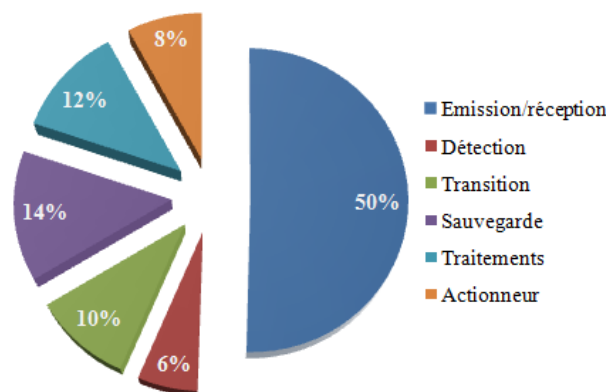


Figure 3.11 Taux de consommation énergétique dans un RCSF

Maximiser et estimer la durée de vie d'un RCSF nécessite la mise en œuvre d'un modèle de consommation énergétique qui rentre en adéquation avec l'application considérée. Plusieurs travaux de recherche ont investi ce contexte en proposant des modèles plus ou moins précis spécifiant certaines sources de consommation d'énergie (Tab.3.2).

Le modèle d'Heinzelman par exemple [134] ne prend en compte que des modèles énergétiques liés aux traitements processeur et à la transmission radio. Miller [135] compte à lui considère en plus les transitions des états des NC. Le modèle de Zhu [136] intègre l'énergie de détection à celles des traitements et des communications. Rarement, les modèles liés à la détection, la mémorisation et aux actionneurs sont considérés.

Sources de consommation d'énergie	Heinzelman	Miller	Zhu
Traitements processeur			
Emission/réception			
Détection			
Transition			
Sauvegarde			
Actionneur			
Formation des clusters			

Tableau 3.2 Sources de consommation d'énergie

Proposer une solution de routage donc doit s'établir principalement en fonction du contexte, du type d'application considérée en identifiant les sources de consommation d'énergie et surtout des paramètres à prendre en compte. Il est donc important non pas de faire un choix sur un routage spécifique au détriment d'un autre mais tirer profil de l'ensemble des solutions existantes. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux réseaux denses particulièrement structurés de façon hiérarchique et l'objectif étant d'apporter des améliorations de performances d'un point de vue consommation énergétique et délais d'acheminement de l'information en se basant sur des modèles de consommation liés aux traitements processeurs, à la radio ainsi qu'à la formation des clusters. Pour ce faire, nous proposons une approche de routage hiérarchique hybride HHRP qui repose sur un mécanisme de clusterisation et qui permet une optimisation énergétique par exploitation d'informations type localisation. Sa mise en œuvre passe par trois phases principales : une phase de déploiement et d'initialisation du réseau dans laquelle des nœuds sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel. Une phase de construction des clusters, qui est le cœur du mécanisme HHRP et qui consiste à structurer le réseau en un ensemble d'ilots, i.e., clusters, dans lesquels des nœuds maîtres CHs assurent la coordination de l'ensemble des nœuds dits membres NM et les traitements. Les CHs ont la possibilité de communiquer directement avec la station de base ou sur plusieurs sauts en passant par d'autres nœuds maîtres jouant le rôle de relais. Une phase de communication qui correspond à la transmission des données selon des protocoles de routage prédéfinis d'avance. L'objectif ainsi étant de sélectionner, par optimisation de critères, le meilleur chemin pour acheminer les données vers la destination. L'idée étant de définir une ou plusieurs fonctions de performances qui permettent de tenir compte d'un ensemble de paramètres tels que les distances parcourues de la source vers la destination, le nombre de sauts, les délais bout-en-bout, la puissance du signal, la consommation d'énergie et/ou le nombre de sauts.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la problématique de routage dans les RCSF en s'intéressant particulièrement aux réseaux denses. Nous avons exploré l'ensemble des solutions de routage développées dans la littérature en attirant l'attention sur les facteurs améliorant et/ou dégradant les performances et le fonctionnement des réseaux. Nous avons montré que la mise en œuvre de ces solutions doit prendre en compte des contraintes de type fonctionnel et/ou structurel telles que les caractéristiques intrinsèques des capteurs (consommation d'énergie, calcul et mémorisation) et environnementales (topologie du réseau, absence d'infrastructure, perte de nœuds). Après analyse de l'existant, nous proposons une approche de routage hiérarchique hybride HHRP qui repose sur un mécanisme de clusterisation mettant en œuvre un modèle énergétique non linéaire afin d'apporter des améliorations tant au niveau de la consommation d'énergie qu'au niveau délais des traitements et d'acheminement des données. Le mécanisme utilise le concept de communication Fils-Parent et

sélectionne les meilleurs chemins pour atteindre la destination finale par minimisation d'une fonction de performance par rapport à des paramètres critiques tels que les distances source-cible, la puissance du signal et la consommation d'énergie. Afin de montrer ses performances, nous réalisons une étude comparative avec deux autres mécanismes à savoir LEACH et TEEN. L'étude détaillée sera présentée dans le quatrième chapitre.

Chapitre 4

HHRP : Mécanisme adaptatif pour le routage d'informations dans les RCSF hiérarchisés

Dans les RCSF, l'exploitation efficace de l'information dépend fortement non seulement des processus de traitement et d'exploitation des données, mais aussi des méthodes qui permettent son acheminement. Pour ce faire, il est nécessaire de prendre en compte des contraintes de type fonctionnel et/ou structurel en d'autres termes, des caractéristiques intrinsèques des capteurs (consommation d'énergie, calcul et mémorisation) et environnementales (topologie du réseau, absence d'infrastructure, perte de nœuds). La communication entre les différents nœuds capteurs doit obéir à un protocole de routage bien défini d'avance dépendant à son tour du type d'application et de l'architecture du réseau, qu'elle soit plate ou hiérarchisée. Un choix adéquat du protocole doit permettre non seulement une fluidité de l'information mais aussi une optimisation de la consommation de l'énergie et des ressources (temps de calcul et de capacité de stockage). C'est un défi d'actualité. L'objectif de ce chapitre rentre dans ce même contexte, en proposant un mécanisme de routage adaptatif HHRP¹ mettant en œuvre un modèle énergétique non linéaire afin d'apporter des améliorations tant au niveau de la consommation d'énergie qu'au niveau délais des traitements et d'acheminement des données. Le mécanisme utilise le concept de communication Fils-Parent et sélectionne les meilleurs chemins pour atteindre la destination finale par minimisation d'une fonction de performance par rapport à des paramètres critiques tels que les distances source-cible, la puissance du signal et la consommation d'énergie. Le mécanisme met en œuvre entre autre, des méthodes d'accès à la couche MAC type CSMA/CA² et TDMA³ afin d'éviter de probables collisions et interférences lors des échanges.

4.1 Introduction

Protocole très approprié pour des applications RCSF type monitoring ou surveillance environnementale, LEACH⁴ est un protocole qui tourne sur des plateformes hiérarchisés. Il permet une structuration du réseau en clusters avec comme objectifs l'accroissement de la couverture réseau, la prolongation de sa longévité tout en optimisant la consommation d'énergie [16]. Des nœuds capteurs sont sélectionnés de manière aléatoire en tant que Cluster-Head CHs pour représenter les différents clusters et dont le rôle étant de communiquer avec l'ensemble des nœuds appartenant à son cluster,

¹ Hybrid Hierarchical Routing Protocol

² Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance

³ Time division multiple access

⁴ Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

centraliser périodiquement les données collectées, réaliser les traitements, i.e., l'agrégation, puis les transmettre directement vers la station de base si cette dernière est atteignable ou vers d'autres CHs, dans le cas contraire.

Comme l'illustre la figure 4.1, la mise en œuvre du protocole passe dans un premier temps par une phase d'initialisation du réseau où des clusters sont formés avec des CHs présélectionnés, et dans un second temps par une phase de fonctionnement en régime stable où la communication avec la station de base prend effet.

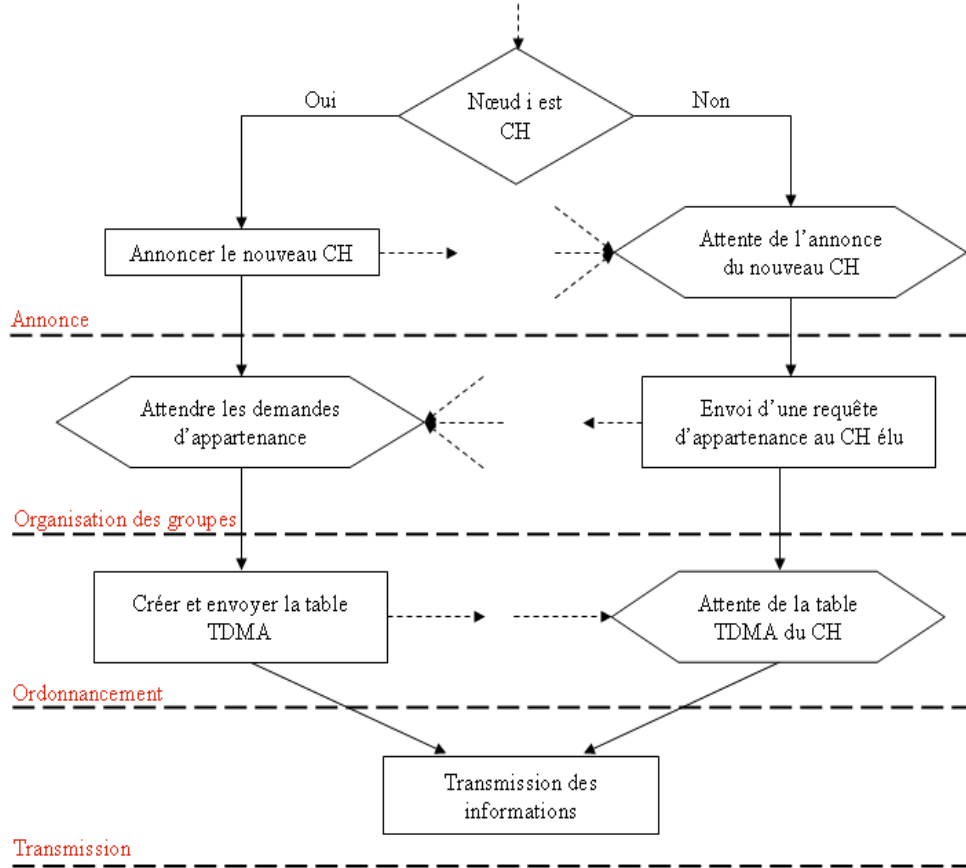


Figure 4.1 Phases de mise en œuvre du protocole LEACH

Durant la phase d'annonce et création de clusters, la station de base annonce le déroulement d'un nouveau round. Avec un pourcentage de sélection des CHs établi d'avance (5%-15%), les nœuds s'auto-élisent pour être des CHs selon une probabilité d'élection définie comme suite :

$$P_{rob}(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \cdot \text{mod}(\frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (4.1)$$

Les paramètres P et r désignent respectivement le pourcentage des nœuds désirant être CH et l'itération ou le round courant. G étant l'ensemble des nœuds n'étant pas des CHs durant les dernières $(\frac{1}{P})$ itérations. Le nombre n étant une valeur aléatoire comprise dans l'intervalle $[0,1]$ attribuée à un nœud. Si cette dernière est inférieure à un seuil $T(n)$, le nœud se déclare CH puis informe ses voisins de son élection.

Ainsi, un message d'avertissement contenant son identifiant en tant que CH est diffusé via un protocole MAC CSMA/CA permettant d'éviter de probables collisions et interférences entre les différents CHs adjacents. Les nœuds décident d'appartenir à des CHs en tenant compte de l'amplitude

du signal reçu. Le CH ayant diffusé un signal de plus grande amplitude aura une probabilité plus importante d'être choisi par rapport aux autres CHs. En cas d'égalité, le choix d'appartenance à un CH se fait aléatoirement. Cela passe par l'envoi du nœud d'un paquet d'affiliation au CH choisi, ce dernier renvoi un message d'acquiescement pour la confirmation.

En se basant sur la méthode d'ordonnancement de tâche, il met en œuvre le protocole MAC TDMA et assigne à chacun des NM de son cluster, un intervalle de temps ou *time slot* pendant lequel le nœud peut communiquer ses informations. L'ensemble des slots assignés aux nœuds d'un groupe constitue un *Frame*, dont la durée diffère selon le nombre de nœuds du cluster [1]. La figure 4.2 illustre les différentes phases de formation des CHs.

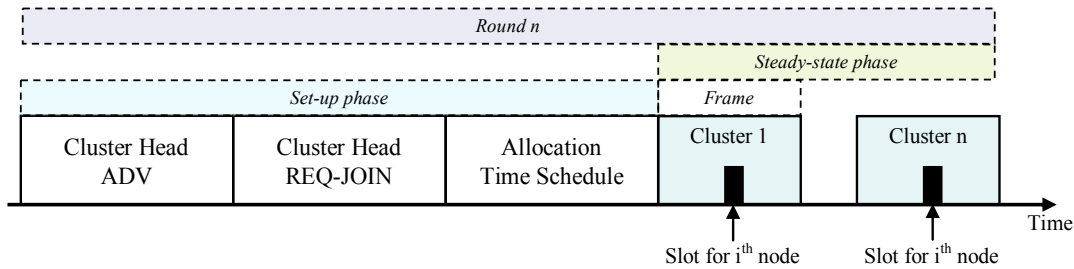


Figure 4.2 Phases de formation des CHs

La phase de transmission permet indirectement de se prononcer sur les performances et la robustesse de l'algorithme de routage. En se basant sur la méthode TDMA, les NM communiquent leurs données vers leurs CH, elles seront agrégées puis transmises directement ou indirectement vers la station de base. Les NM non actifs ont la possibilité de se mettre en veille pour économiser l'énergie. Contrairement à plusieurs travaux tels que la diffusion dirigée ou à SPIN [89] qui se basent sur l'optimisation des chemins et l'utilisation l'exploitation d'information sous forme de métadonnées, le protocole LEACH est le seul à fournir de meilleurs résultats en termes de d'optimisation de la consommation énergétique et donc l'accroissement de la durée de vie du réseau [12]. C'est l'une des principales motivations qui nous ont conduites à faire ce choix comme base de notre travail de recherche.

Dans ce protocole, le traitement des données au niveau de chaque cluster se fait localement et le rôle de chaque CH est de coordonner les échanges avec les autres nœuds membres NM. Le réseau possède la capacité de s'auto-réorganiser lors de la phase d'élection des CHs. Chaque nœud a la possibilité d'être élu CH et vis versa, chaque CH peut redevenir un simple NM pouvant appartenir à un cluster.

L'élection d'un CH se base sur des critères énergétiques. Plus le nœud possède une énergie importante plus il peut devenir CH. Une fois ce dernier est élu, il communique avec l'ensemble des NM selon un protocole d'accès à la couche MAC type TDMA. Il réalise entre autre des fonctions d'agrégation des données issues des NM optimisant ainsi les délais de traitement. Contrairement aux NM, les CHs sont en activité permanente puisqu'ils communiquent soit avec l'ensemble des nœuds appartenant à leurs clusters, soit ils échangent des données avec la station de base. Ce processus amoindri fortement les énergies résiduelles des différents CHs réduisant ainsi leurs capacités opérationnelles et le rendement global du réseau. Dans le cas des réseaux fortement denses, ce protocole ne présente plus une solution adéquate pour accroître les performances en termes d'optimisation des ressources, de consommation énergétique, et de délais de traitements/acheminement des données. En effet, lors de la phase d'annonce et de création de clusters (*Setup phase*), la sélection et la répartition des CHs dans le réseau se fait aléatoirement selon une politique de gestion Round-Robin (garantir une consommation d'énergie uniforme de l'ensemble des nœuds) induisant dans quelques cas à une forte concentration au niveau d'une zone par rapport à une autre, et par conséquent, y avoir des nœuds complètement isolés (sans CH) et donc disparaître du réseau. Le choix des CHs ne suppose aucune contrainte sur leur distribution ni sur leur niveau d'énergie. Par ailleurs, on peut être confronté à des situations où l'ensemble des nombres aléatoires générés par les nœuds capteurs soit inférieur à la probabilité émise

par la station de base, dans ce cas, aucun CH n'est élu. La station de base doit reprendre tout simplement le contrôle en émettant une nouvelle probabilité via un message d'annonce d'un nouveau round provoquant une surconsommation énergétique inutile et une perte de temps.

Pour y remédier, nous proposons dans la section suivante un mécanisme de routage hiérarchisé nommé, HHRP [137-139].

4.2 Mécanisme de routage adaptatif HHRP

L'objectif principal du mécanisme de routage HHRP étant d'apporter des améliorations significatives sur les performances du protocole standard LEACH. Son développement et sa mise en œuvre passe par l'établissement de critères de satisfaction, à savoir, la consommation d'énergie et les délais de traitement et d'acheminement des informations vers une destination, quelle soit la position de la station de base ou des CHs adjacents. En effet, contrairement à LEACH qui suppose que tous les nœuds disposent d'une énergie suffisante pour communiquer directement (un saut) avec la BS, HHRP peut le réaliser sur plusieurs sauts limitant une surconsommation d'énergie, particulièrement pour les nœuds plus éloignés, et donc leur isolement et leur disparition à terme. Le mécanisme permet aussi une distribution homogène des CHs sur l'ensemble du réseau et surtout limite le nombre de rotation de CH lors de la diffusion des nouveaux rôles par la station de base.

Comme l'illustre la figure 4.3, l'approche de routage proposée repose sur un mécanisme de clusterisation et de routage d'information qui s'articule sur trois phases principales : une phase de déploiement et d'initialisation du réseau dans laquelle des nœuds capteurs avec des caractéristiques bien définies et spécifiques au type d'application sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel.

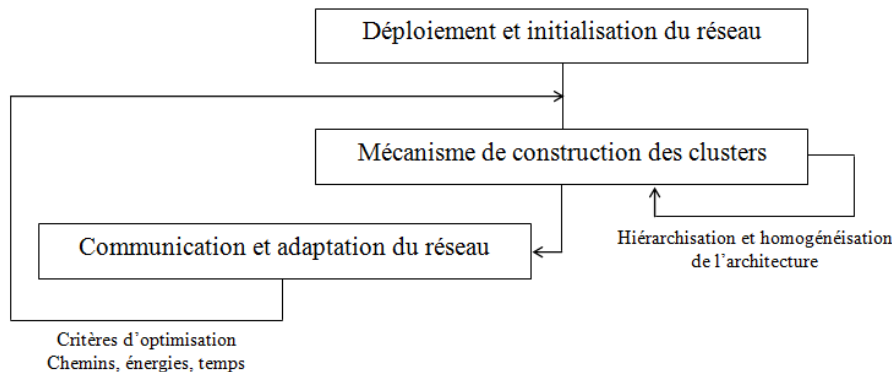


Figure 4.3 Synoptique de bases du mécanisme HHRP

La phase de construction des clusters, qui représente le cœur du mécanisme HHRP, consiste à structurer le réseau en un ensemble d'ilots dans lesquels des nœuds maîtres (CH) assurent la coordination de l'ensemble des nœuds membres (NM) et les traitements. Les nœuds maîtres ont la possibilité de communiquer directement (saut unique) avec la station de base ou sur plusieurs sauts en passant par d'autres nœuds maîtres jouant le rôle de relais. L'architecture hiérarchisée du réseau illustrée sur la figure 4.4 en est un bel exemple. On distingue clairement un réseau structuré en ilots ou clusters avec à chacun son propre CH recevant des données de l'ensemble de ses NMs ou communiquant soit directement ou indirectement avec la station de base. L'élection des CHs et leur nombre doit obéir à des critères de sélection préétablis d'avance en lien avec l'application et de la densité du réseau. En pratique, le nombre de CHs oscille entre 5% et 15% du nombre total du nombre de nœuds. Un réseau à 20 nœuds ne peut contenir 15% de CHs puisque qu'il est de faible densité, ou un réseau à 500 nœuds ne peut disposer que de 5% de CHs. Un mauvais choix sur ce nombre conduit inéluctablement à une disparition rapide du réseau. Il est donc primordial d'estimer le nombre de CHs à l'initialisation.

Des travaux de recherche ont été abordés dans ce sens [140-142] mais d'une manière globale, des simulations ont montré que quelque soit la dimension du réseau, le nombre optimal de CHs à l'initialisation avoisinerait dans tout les cas les 10%.

La phase de communication correspond à la transmission des données entre nœuds selon des protocoles de routage prédéfinis d'avance. L'objectif ainsi étant de sélectionner, par optimisation de critères, le meilleur chemin pour acheminer les données vers la destination. A titre d'exemple, le nœud maître CH-5 dispose de plusieurs possibilités pour acheminer ses informations vers la station de base (Figure-4.4). Il peut utiliser plusieurs séquences : CH-5-CH-9-CH-3-SB, CH-5-CH-3-SB, ... La question à se poser, quel chemin sélectionner pour atteindre la station de base en optimisant l'utilisation des ressources, la consommation d'énergie, les délais d'acheminement, etc. ?

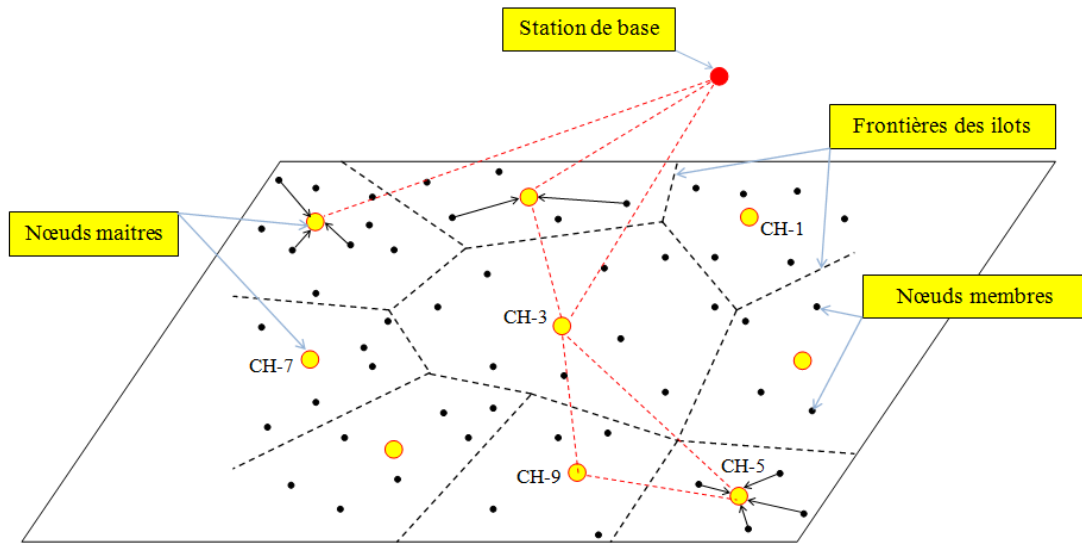


Figure 4.4 Architecture du hiérarchisée du réseau

L'idée étant donc de définir une ou plusieurs fonctions de performances qui permettent de tenir compte d'un ensemble de paramètres tels que les distances parcourues de la source vers la destination, le nombre de sauts, les délais bout-en-bout, la puissance du signal, la consommation d'énergie et/ou le nombre de sauts. Pour ce faire, il est primordial de définir la structure et la topologie du RCSF à déployer.

1. Structure et topologie du réseau

La mise en œuvre du mécanisme se base sur une architecture hiérarchisée de type homogène ou hétérogène, constituée d'un ensemble de clusters et/ou de zones. Chaque cluster est constitué d'un ensemble de nœuds appelés nœuds membres NMs avec un nœud représentatif jouant le rôle de coordinateur appelé Cluster Head ou CH. Comme dans LEACH, il permet de réaliser des traitements et relayer directement les informations entre les nœuds du cluster et la station de base ou indirectement via d'autres nœuds CHs. Cela dépend de la portée du signal et de la zone de couverture. Plus les nœuds sont éloignés de la station de base, plus ils utilisent les services d'autres nœuds pour atteindre la destination. La communication est assurée sur deux niveaux hiérarchisés : intra-cluster et inter-clusters (Figure-4.5).

Les communications intra-cluster, i.e., *Intra-Hs communication*, concernent les échanges effectués dans un cluster donné entre l'ensemble des NMs et le CH correspondant. Cela peut concerner, à titre d'exemple, les messages d'appartenances, de diffusion de statut, d'attribution de slots temporaire ou tout simplement de transmission de données effectives des NMs vers les CHs.

En revanche, les communications inter-clusters, i.e., *Inter-Hs communication*, elles englobent les échanges d'informations entre les différents CHs ou entre les CHs et la station de base. Un CH situé à

une distance non atteignable par la station de base et souhaitant transmettre un message à celle-ci, a la possibilité de passer par plusieurs CHs voisins pour y parvenir. Il devra ainsi, tenir compte des différentes contraintes imposées par l'application pour déterminer le chemin optimal. Il atteindra la station de base sur un seul ou plusieurs sauts (multi-sauts).

L'avantage est que si un nœud ne dispose pas d'assez d'énergie pour atteindre la station de base, il pourra router ses données via d'autres nœuds CHs pour qu'elles soient relayées vers la destination finale. Il est à noter que l'utilisation de plusieurs sauts optimise la consommation d'énergie car les distances de transmission sont plus courtes. Plusieurs CHs sont sollicités permettant ainsi une uniformisation et homogénéisation de la dépense énergétique sur l'ensemble du réseau.

L'inconvénient de disposer de plusieurs sauts peut affecter les temps d'acheminement de l'information étant donné qu'elle doit suivre plusieurs tronçons pour y arriver. L'objectif étant donc de déterminer les meilleurs choix à effectuer pour transmettre les données d'une source vers une destination en conciliant à la fois plusieurs paramètres, à savoir : la consommation d'énergie, la puissance des signaux, les délais d'acheminement de l'information et le nombre de sauts.

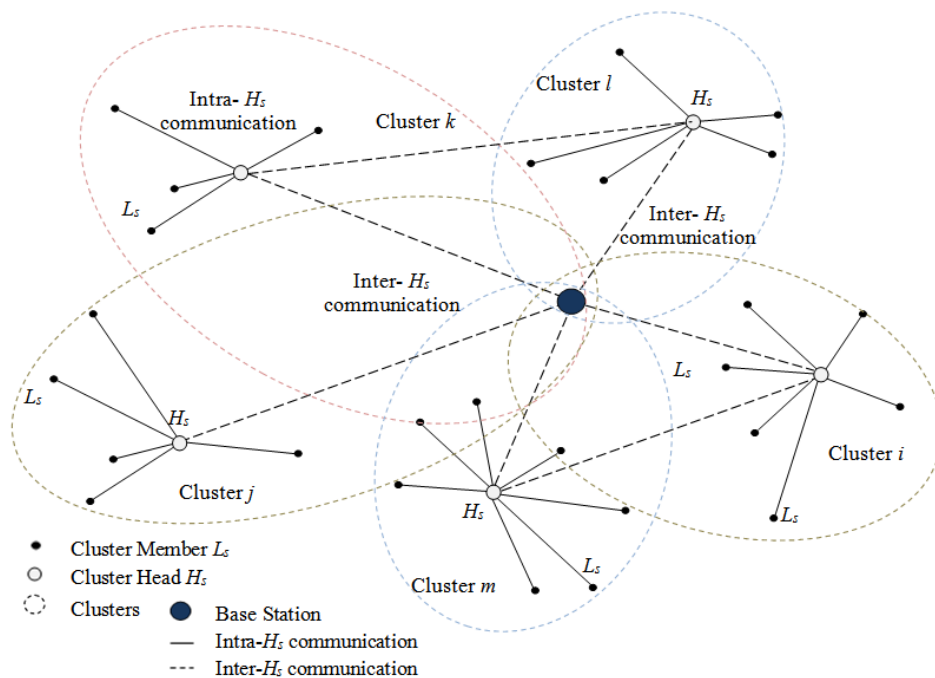


Figure 4.5 Architecture hiérarchisée du RCSF

L'architecture hiérarchisée présentée ci-dessus repose sur l'exploitation d'un modèle énergétique qui tient compte des différents états ou modes de fonctionnement d'un nœud capteur dans le réseau. En modes transmission/réception, le nœud capteur consomme des quantités d'énergie importantes pour transmettre ou recevoir des messages structurés sous forme d'octets. Plus le nombre d'octets est grand, plus les messages sont importants et plus l'énergie dissipée devient conséquente. Pour optimiser le nombre d'octets à traiter, nous utilisons le principe d'agrégation des données à base de fonctions mathématiques, dans notre cas, c'est la moyenne.

Une fois la radio activée, le nœud capteur se trouve dans un état actif sans pour autant transmettre ni recevoir des données engendrant ainsi une perte d'énergie additionnelle inutilement. C'est le cas des CHs qui sont toujours en attente de message. Afin d'éviter cela, le nœud capteur peut sommeiller en déconnectant sa radio. Le passage d'un mode sommeil à un mode actif nécessite le redémarrage de plusieurs softs et composants impliquant une consommation d'énergie plus importante que si le nœud capteur restait en mode actif. La gestion d'énergie peut être alors assurée par un protocole de la sous-couche MAC.

Dans ce qui suit, nous présentons le modèle énergétique utilisé dans le cadre de l'approche de routage proposée.

2. Modèle énergétique

Comme l'illustre la figure 4.6, le processus énergétique considéré utilise un modèle de consommation qui couvre à la fois et uniquement les modes émission et réception de données [108]. C'est un modèle universel très utilisé et qui a montré son efficacité.

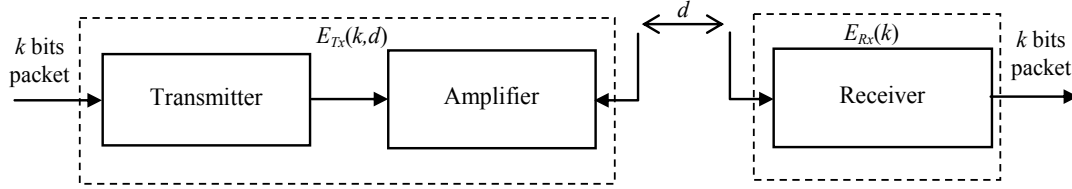


Figure 4.6 Modèle de consommation d'énergie

Ainsi, pour transmettre un message codé sur k bits sur une distance d , l'émetteur consomme :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx_{elec}}(k) + E_{Tx_{amp}}(k, d) \quad (4.2)$$

Avec :

$$E_{Tx_{elec}}(k) = kE_{elec} \quad (4.3)$$

Et :

$$E_{Tx_{amp}}(k, d) = \begin{cases} k\epsilon_{fs}d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \\ k\epsilon_{tr}d^4 & \text{si } d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (4.4)$$

Lors de la communication radio, l'énergie consommée au niveau de la réception est calculée comme suite :

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx_{elec}}(k) = kE_{elec} \quad (4.5)$$

Les paramètres E_{elec} et $E_{Tx_{amp}}$ représentent respectivement l'énergie de transmission/réception électronique et l'énergie d'amplification, ϵ_{amp} étant le facteur d'amplification et $d_{crossover}$ distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

Une fois sélectionnés, les CHs restent en activité permanente assurant une communication intra-CH et/ou extra-CHs. En se basant sur le modèle radio (4.2) et (4.5), l'énergie moyenne consommée par chaque CH peut être calculée comme suite :

$$E_{moy} = p_r \left(E_{Tx}(k, d) + E_{Rx} \left(\frac{T_{inter}}{T} - k \right) \right) + (1 - p_r) \left(E_{Rx} \left(\frac{T_{inter}}{T} \right) + E_{Rx} \left(\frac{T_{intra}}{T} \right) \right) \quad (4.6)$$

où p_r étant la probabilité que chaque nœud dispose d'une donnée codée sur k bits à envoyer durant un cycle quelconque. Le paramètre T représente le temps mis pour l'envoi d'un octet de données, T_{inter} et T_{intra} respectivement le temps de communication entre les différents CHs et la station de base, et le temps de communication entre les CHs et les nœuds membres pendant un round donnée.

Dans le premier terme de (4.6), pour une probabilité p_r correspondant à une phase de communication inter-CHs, l'ensemble des CHs transmettent les informations vers la station de base, consommant une

énergie équivalente à $E_{Tx}(k, d)$. Le temps restant $\left(\frac{T_{inter}}{T} - k\right)$ correspondant au temps d'écoute du CH dont l'énergie consommée est $E_{Rx}\left(\frac{T_{inter}}{T} - k\right)$.

Le second terme de (4.6) correspondant à une probabilité $(1 - p_r)$, le CH ne transmet aucune donnée vers la station de base. Il passe tout son temps de communication inter-CHs en mode écoute consommant une énergie équivalente à $E_{Rx}\left(\frac{T_{inter}}{T}\right)$. Durant la phase de communication intra-CH, le CH passe en mode réception consommant une énergie équivalente à $E_{Rx}\left(\frac{T_{intra}}{T}\right)$.

L'approche proposée HHRP que nous détaillerons dans la section suivante, repose sur un mécanisme de clusterisation et de routage dont l'objectif étant de prolonger la durée de vie d'un RCSF en optimisant la consommation d'énergie, les délais d'acheminement de l'information et l'exploitation des ressources.

4.3 Description du mécanisme de clusterisation et de routage

Comme énoncé dans la section 3.2, L'approche proposée HHRP repose sur un mécanisme de clusterisation et de routage d'information. Sa mise en œuvre passe par trois phases principales : une phase de déploiement et d'initialisation du réseau dans laquelle des nœuds capteurs sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel. Une phase de construction des clusters, qui est le cœur du mécanisme HHRP et qui consiste à structurer le réseau en un ensemble d'ilots, i.e., clusters, dans lesquels des nœuds maîtres (CHs) assurent la coordination de l'ensemble des NMs et les traitements. Les CHs ont la possibilité de communiquer directement avec la station de base ou sur plusieurs sauts en passant par d'autres nœuds maîtres jouant le rôle de relais. Une phase de communication qui correspond à la transmission des données selon des protocoles de routage prédéfinis d'avance. L'objectif ainsi étant de sélectionner, par optimisation de critères, le meilleur chemin pour acheminer les données vers la destination. L'idée étant de définir une ou plusieurs fonctions de performances qui permettent de tenir compte d'un ensemble de paramètres tels que les distances parcourues de la source vers la destination, le nombre de sauts, les délais bout-en-bout, la puissance du signal, la consommation d'énergie et/ou le nombre de sauts. La figure 4.7 illustre le mécanisme dans sa globalité et particulièrement le comportement d'un nœud capteur lors la mise en œuvre du réseau.

1. Déploiement et initialisation du réseau

Après un déploiement aléatoire ou structuré des nœuds capteurs dans l'environnement opérationnel, l'initialisation du réseau passe, dans un premier temps, par l'établissement d'un message d'initialisation *Message_Init_SB* de la forme :

$$Message_{Init_{SB}}(ID_{N_i}, ID_{N_j}, P_{rob}, N_{hops}) \quad (4.7)$$

Avec ID_{N_i} et ID_{N_j} représentant respectivement les identifiants des nœuds source N_i et destination N_j , P_{rob} une probabilité et N_{hops} la profondeur d'un nœud par rapport à la station de base.

Dans un premier temps, la station de base spécifie le nombre de clusters que le réseau doit contenir puis commence par diffuser des messages d'initialisation *Message_Init_SB* sur l'ensemble du réseau, en générant aléatoirement une probabilité P_{rob} , décrite en (4.1) pour l'élection des CHs initiaux.

Comme énoncé précédemment, le nombre de CHs n_{CH} correspond à 10% du nombre total des nœuds n constituant le réseau, et se calcule comme suite :

$$n_{CH} = (10\%)n \quad (4.8)$$

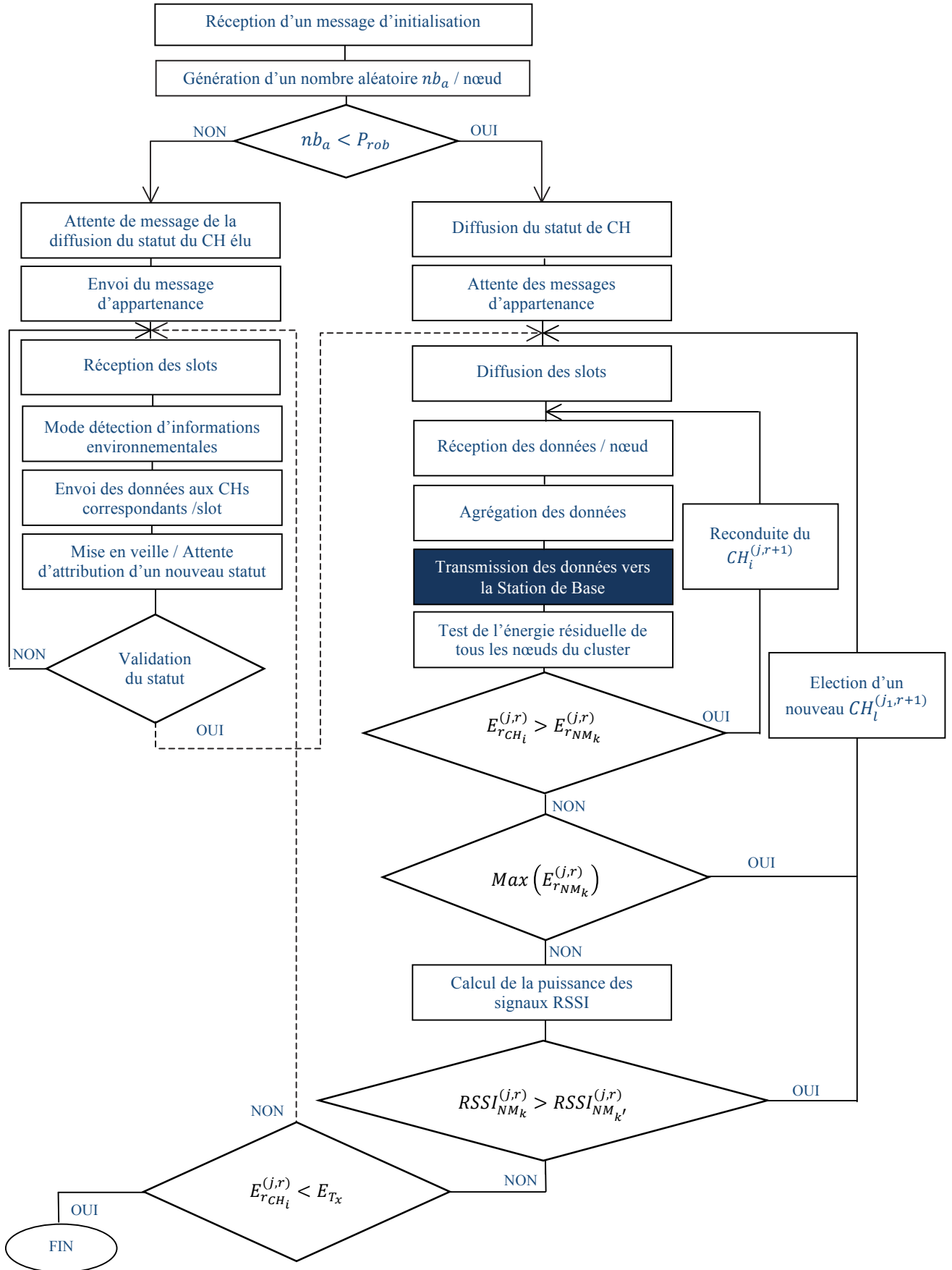


Figure 4.7 Comportement d'un nœud capteur dans un RCSF selon le protocole HHRP

Une diffusion consiste à émettre au même instant sur plusieurs cibles un même message en mettant à zéro les valeurs des adresses cibles. Ainsi, comme l'illustre la figure 4.8, la station de base (SB) diffuse le message $(ID_{SB}, 0, P_{rob}, 0)$ et une fois intercepté par un nœud, ce dernier identifie la source, l'information reçue (P_{rob}), réalise une série de traitements dont une partie sera acheminée ultérieurement vers la station de base puis rediffuse le message vers ses voisins. Parallèlement à cela, il construit sa propre table de routage.

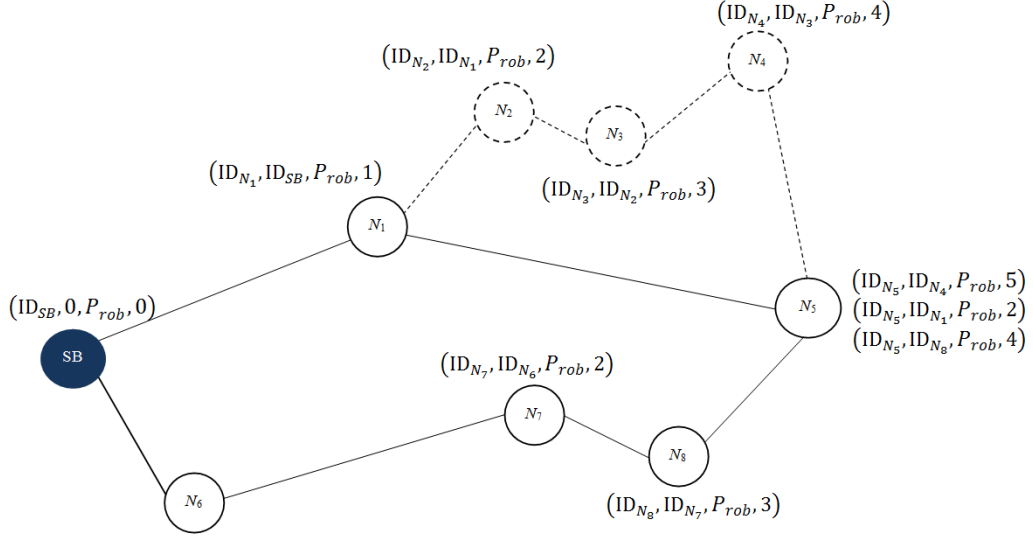


Figure 4.8 Exemple d'envoi d'un message d'initialisation

Les traitements consistent dans un premier temps, à incrémenter le nombre de sauts (N_{hops}), tel que :

$$N_{hops(i+1)} = N_{hops(i)} + 1 \quad (4.9)$$

Avec (i) l'indice d'un nœud capteur quelconque.

C'est une étape de reconnaissance de l'environnement, du voisinage immédiat et de la profondeur des nœuds par rapport à la station de base.

Remarque 4.1 : La construction d'une table de routage est primordiale car cela permettra, le cas échéant, de sélectionner les meilleurs chemins, selon des critères spécifiés d'avance, pour router l'information vers la destination (SB). On remarque bien que le nœud capteur (N_5) perçoit plusieurs messages des différents nœuds source (N_1), (N_4) et (N_7). Si le critère choisi porte sur le nombre minimal de sauts, alors (N_5) peut atteindre la station de base via un nœud capteur relais qui n'est autre que le nœud (N_1).

Par ailleurs, un nœud source doit disposer d'une puissance de transmission P_{Tx} suffisante pour acheminer une information type *Message_Init_SB* vers un nœud cible. En fonction de la distance d séparant les deux nœuds, P_{Tx} influera sur la puissance de réception P_{Rx} du nœud cible. Ainsi, en se basant sur la formulation de Friis pour la transmission de messages dans un espace libre [143], la puissance du signal reçu décroît de manière quadratique en fonction de la distance de l'émetteur :

$$P_{Rx} = P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4.10)$$

Avec G_{Tx} et G_{Rx} et λ respectivement le gain du transmetteur, du récepteur et la longueur d'onde.

Dans les architectures embarquées, la puissance du signal reçu est convertie en $RSSI^5$ qui à son tour se définit comme étant le ratio de la puissance reçue à la puissance de référence P_{ref} . Généralement, la puissance de référence représente une valeur absolue de ($P_{ref} = 1mW$).

Le RSSI peut être ainsi formulé comme suite :

$$RSSI = 10 \log \left(\frac{P_{Rx}}{P_{ref}} \right) [dBm] \quad (4.11)$$

Comme on le constate, plus la puissance de réception est grande plus le RSSI augmente. En revanche plus la distance d séparant les nœuds source et cible est grande plus le RSSI diminue.

Un autre modèle générique pour le calcul du RSSI appelé *log-normal shadowing* [144] a été développé et qui est décrit par :

$$RSSI(d) = P_{Tx} - PL(d_0) - 10\eta \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\sigma [dBm] \quad (4.12)$$

où P_{Tx} et $PL(d_0)$ représentent respectivement la puissance de transmission et la perte du signal pour une distance de référence d_0 dont l'exposant est η . Les variations aléatoires sont exprimées sous forme gaussienne de moyenne nulle et de variance σ^2 : $X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Sous TinyOS, pour un composant radio type CC2420 d'un capteur Mica2, les valeurs RSSI fournies par la couche physique sous protocole ZigBee sont codées sur un octet moyennées sur 8 périodes de temps de $128\mu s$ approximativement. La puissance du signal radio calibrée est calculée par la formule suivante :

$$P = RSSI_{val} + Offset_{RSSI} [dBm] \quad (4.13)$$

Où $Offset_{RSSI}$ est une valeur corrective définie de manière empirique et est estimée approximativement à $-45dBm$.

Dans la sous-section suivante, nous verrons l'utilité du calcul de la puissance du signal reçu RSSI.

2. Construction et clusterisation de l'architecture du WSN

Après un déploiement aléatoire ou structuré des nœuds capteurs dans l'environnement, vient ensuite la phase de construction des clusters, cœur du mécanisme HHRP, elle consiste à structurer le réseau en un ensemble d'îlots, dans lesquels des nœuds maîtres CHs assurent la coordination de l'ensemble des NMs et les traitements. Chaque nœud capteur doit générer un nombre aléatoire nb_a qui sera comparé à la probabilité P_{rob} pour décider de son futur rôle à jouer en tant que CH ou un simple NM :

$$\text{Un nœud } (i) \text{ est : } \begin{cases} \text{Potentiellement CH si } nb_a \leq P_{rob} \\ \text{NM si non} \end{cases} \quad (4.14)$$

2.1 Diffusion des statuts

Avant de diffuser leur nouveau statut vers l'ensemble des nœuds voisins, l'ensemble des nœuds CHs informent tout d'abord la SB soit en communiquant via un message $Message_{Adv_{CH}}$ directement sur un seul saut soit en sélectionnant des chemins optimaux dans le cas d'une communication multi-sauts. Pour ce faire, à partir de (4.7) et des tables de routage correspondantes, ils déterminent les nœuds possédant le nombre de sauts $N_{hops_{(i)}}$ minimal. La structure du message est la suivante :

$$Message_{Adv_{CH}}(ID_{CH}, ID_{SB}, header) \quad (4.15)$$

⁵ Received Signal Strength Indicator

Les composantes du message ID_{CH_i} et ID_{SB} représentent respectivement les identifiants des nœuds source CH_i et de la SB.

La SB à son tour, récupère tous les messages et construit une table de routage temporaire correspondante à l'ensemble des nœuds qu'ils soient CHs ou nœuds ordinaire.

Remarque 4.2 : *A ce stade, l'ensemble des nœuds, qu'ils soient CHs ou ordinaires, peuvent jouer un rôle de relai. En réceptionnant un message, ils le transmettent directement vers la destination sur un seul saut soit en relayant le message à leur tour via d'autres nœuds relais.*

Dans un second temps, chaque nœud CH diffuse vers l'ensemble des nœuds voisins, i.e., CHs ou NMs, via une diffusion son nouveau statut par l'envoi d'un message d'avertissement de petite taille $Message_{Adv_{CH}}(ID_{CH_i}, ID_{SB}, header)$ contenant son identifiant ID_{CH_i} et un entête *header* pour spécifier que c'est un message d'annonce. Pour cela, il utilise une méthode d'accès à la couche MAC type CSMA afin d'éviter de probables collisions et interférences lors des échanges. En même moment, le restant des nœuds capteurs est en attente du message $Message_{Adv_{CH}}$.

Une fois $Message_{Adv_{CH}}$ réceptionné, chaque nœud capteur non-CH détermine son appartenance à un cluster en sélectionnant le CH nécessitant le minimum d'énergie de transmission. La décision d'appartenance se base sur la puissance du signal reçu RSSI du message d'avertissement $Message_{Adv_{CH}}$. Plus l'intensité du signal RSSI par rapport à un nœud CH est importante plus il nécessite moins d'énergie de transmission et donc il est plus probable d'être sélectionné pour appartenir à son cluster. Il doit informer le CH choisit de son appartenance et devenir un NM en lui envoyant un paquet d'affiliation de type $Message_{Join_{REQ}}$ en utilisant la même méthode d'accès à la couche MAC : CSMA (Figure-4.9).

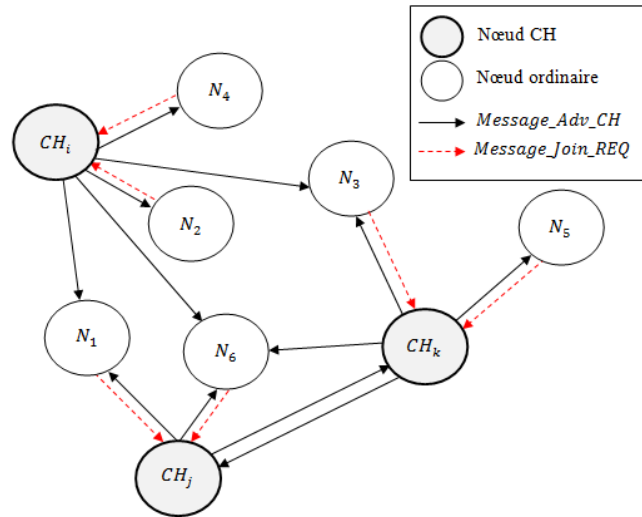


Figure 4.9 Exemple de diffusion de statut et d'envoi de messages d'appartenance

Contrairement à LEACH, HHRP permet d'atteindre l'ensemble des nœuds se trouvant à la frontière du réseau même si la puissance des signaux $Message_{Adv_{CH}}$ est amoindrie. En effet, la communication multi-sauts permet de pallier ce problème et donc d'éviter des transmissions lointaines. Le message $Message_{Join_{REQ}}$ est de petite taille et est structuré comme suite :

$$Message_{Join_{REQ}}(ID_{N_i}, ID_{CH_j}, header) \quad (4.16)$$

Comme l'illustre la figure 4.9, le nœud capteur (N_3) a décidé d'envoyer un message d'appartenance au nœud (CH_k) plutôt qu'au nœud (CH_i) car la puissance du signal représenté par l'indicateur RSSI reçu du (CH_k) est plus importante. Cela se confirme en comparant les distances séparant (N_3) de (CH_k) et (CH_i).

Cas particuliers :

Des cas particuliers peuvent exister. Si par exemple un NC calcule la même valeur RSSI pour deux CHs, il doit prendre une décision sur son appartenance à un cluster. Pour ce faire, il pourra consulter sa table de routage, initialement constituée lors de la phase de reconnaissance, pour vérifier le nombre de sauts (N_{hops}) associés à chacun des deux CHs, nécessaires pour atteindre la SB. Le CH disposant d'un (N_{hops}) inférieur sera sélectionné en lui envoyant un message d'appartenance décrit en (4.15). Dans le cas où le nombre de sauts est identique, alors il procédera à une sélection aléatoire du cluster d'appartenance. Ci-dessous dans la figure 4.10, la routine du pseudo-code correspondant.

```

FOR EACH ( $NM_i$ ) ( $i = 1:n$ )
    IF ( $NM_i$ ) receives several Message_Adv_CH
        Calculate a set of  $RSSI_{CH_j}^{(i)}$  ( $j = 1:k$ )
        Compare RSSI values
        IF ( $RSSI_{CH_h}^{(i)} = RSSI_{CH_l}^{(i)}$ )
            Select lower value of ( $N_{hops}$ )
            Send Message_Join_REQ ( $ID_{NM_i}, ID_{CH_j}, header$ )
        ELSE Compare number of hops ( $N_{hops_{CH_j}}^{(i)}$ )
            IF ( $N_{hops_{CH_h}}^{(i)} = N_{hops_{CH_l}}^{(i)}$ )
                Random selection of ( $CH_j$ )
            END
        END
    END
END
    
```

Figure 4.10 Pseudo-code d'appartenance à un cluster

Avec $RSSI_{CH_j}^{(i)}$ l'indicateur de la puissance du signal reçu du nœud CH_j au niveau du NC ordinaire NM_i .

Remarque 3.3 : Lors de la diffusion des statuts entre nœuds CHs, aucun d'entre eux ne réponds à l'autre du fait qu'ils se considèrent déjà comme nœuds maîtres. Ainsi, il s'auto-enregistre respectivement chacun dans sa table de routage en tant que CHs voisins. Cela permettrait le cas échéant d'assurer une communication inter-CHs multi-sauts pour transmettre des informations à la SB. Dans notre cas par exemple, le nœud capteur (CH_k) peut atteindre la SB qu'en transitant par le nœud capteur (CH_j).

Une fois la phase de clusterisation terminée, que tous les nœuds CHs aient diffusé leurs statuts et réceptionné les messages d'appartenance, une étape de diffusion de slots au niveau de chaque cluster à chacun des NMs est réalisée par les CHs correspondants.

2.2 Attribution des slots

L'attribution des slots par les nœuds CHs est réalisé au niveau de la couche MAC par un ordonnancement des tâches reposant sur la méthode TDMA ou chaque CH assigne à chacun de ses NMs une plage temporaire (*Time Slot*) pendant lequel le nœud peut communiquer ses informations au nœud maître (Figure-4.11).

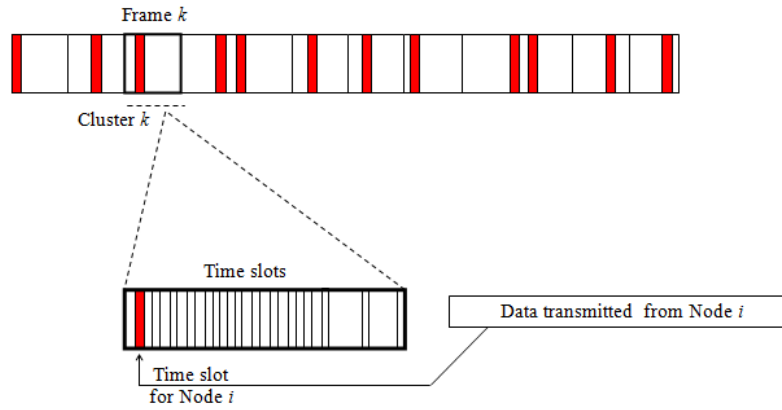


Figure 4.11 Répartition des Time slots dans un cluster

L'ensemble des slots assignées aux nœuds d'un groupe constitue un *Frame*, dont la durée diffère selon le nombre de nœuds du cluster. Cette étape met en œuvre également la distribution des codes CDMA pour éviter les interférences et les collisions entre les nœuds se trouvant dans les clusters adjacents. C'est le cas du protocole TRAMA⁶ qui attribue deux périodes pour lesquelles les nœuds peuvent y accéder à la couche MAC de manière aléatoire qui est consacré ou ordonnancée [145].

3. Transmission et traitement des données

Cette phase consiste en la récolte d'informations, i.e., environnementales par exemple par des NMs, puis traitées localement avant d'être acheminées pendant l'intervalle de temps alloué, respectivement vers les nœuds CHs associés (Figure-4.12).

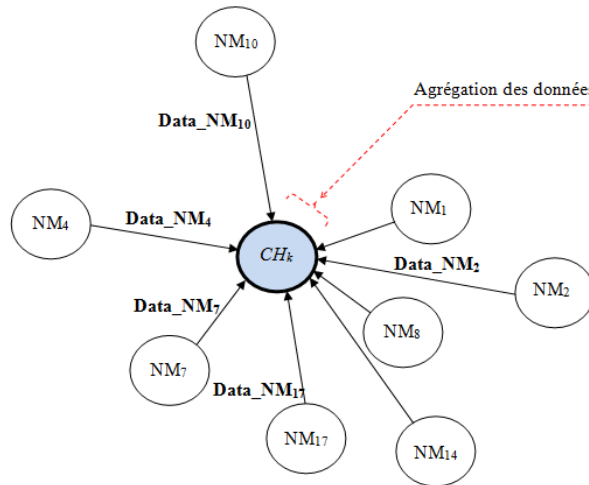


Figure 4.12 Agrégation des données dans un cluster

Une fois l'information transmise, chaque NM active une tâche de mise en veille pour optimiser son énergie. Au sein des clusters, chaque CH réalise une fusion d'informations par agrégation des données **Data_NM_i** perçues de chacun de ses NMs en calculant la moyenne puis transmet le résultat vers la station de base sur un ou plusieurs sauts par optimisation de chemins.

Remarque 4.4 : Il est important de signaler que l'envoi des données **Data_NM_i** par l'ensemble des NMs obéi au principe d'ordonnancement des tâches à base de la méthode TDMA.

⁶ TRAFFIC-Adaptive Medium Access

4.1 Optimisation des chemins CH-SB

L'optimisation des chemins consiste à garantir l'acheminement des données entre les nœuds CHs et la SB à base de fonctions coûts optimisées. L'objectif étant donc de router les données en sélectionnant le meilleur chemin sur la base de la minimisation d'une fonction de performance dépendant d'un ou plusieurs paramètres à optimiser tels que les distances parcourues source-cible, les délais bout-en-bout, la puissance du signal, la consommation d'énergie et/ou le nombre de sauts.

La durée de vie d'un RCSF peut être divisée en un ensemble de rounds ou cycles dans lequel chaque nœud capteur NM ou CH opère sur plusieurs phases (Figure-4.13 (a)-(b)). Pendant chaque round, chaque NM génère un paquet de données qu'il transmet vers son CH en respectant le temps alloué.

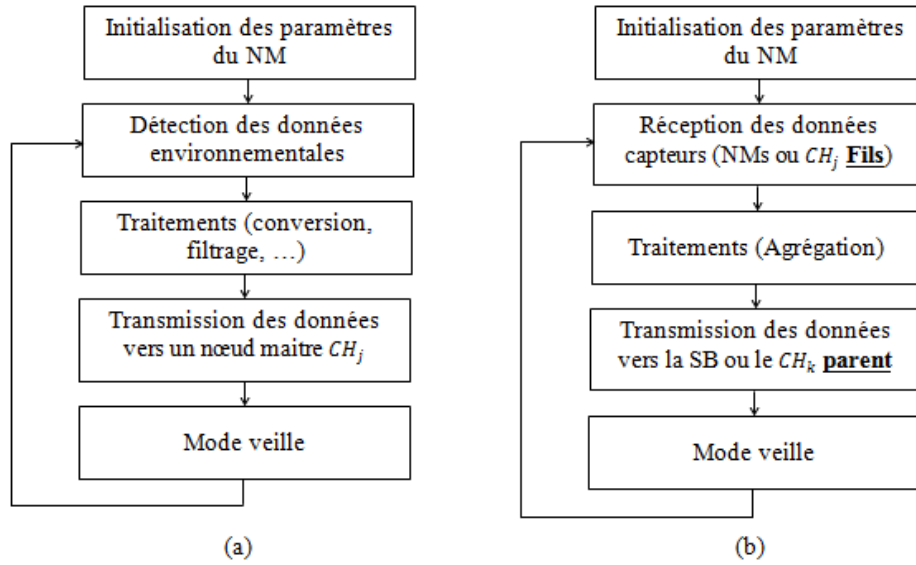


Figure 4.13 Mode opératoire d'un (a) NM et d'un (b) CH

Chaque CH réalise la fusion d'information par agrégation de l'ensemble des données perçues des NMs puis les transmet soit directement vers la SB selon la méthode d'accès à la couche MAC type CSMA/CA ou indirectement via d'autres nœuds CHs parents. Une fois la transmission effectuée, ils se mettent en mode veille attendant d'autres données pouvant provenir de ses propres NMs ou d'autres CHs fils.

La communication Fils-Parent passe par la sélection du meilleur chemin pour atteindre la SB. Pour ce faire, il est primordial de définir puis minimiser une fonction de performance par optimisation de ses paramètres et d'en observer leur évolution dans le temps. Parmi ces paramètres primordiaux, on peut citer par exemple, les distances source-cible, les délais bout-en-bout, la puissance du signal et la consommation d'énergie. En se basant sur le modèle de consommation présenté dans la sous-section 4.2.2, nous pouvons définir deux types de modèles en fonction que le nœud soit CH ou NM. Ainsi, dans le cas d'un cluster, l'ensemble des NMs ne réceptionne pas de messages sous forme de paquets en revanche, ils transmettent des données vers les CHs correspondants en consommant, à chaque round, une énergie :

$$E_{Tx(N)}(k, d_{ij}) = k_N E_{elec} + k_N E_{amp}(d_{ij})^m \quad (4.17)$$

Avec d_{ij} la distance entre le NM_i et le CH_j , et m étant un paramètre de perte d'un chemin. En fonction de l'environnement, i.e., transmission de k_N paquets dans le vide ou dans un espace contraint, il peut prendre respectivement les valeurs 2 ou 4 [146].

Au niveau de chaque cluster, chaque CH transmet k_{CH} paquets directement vers la SB ou en multi-sauts vers un CH_{PARENT} consommant une énergie $E_{Tx(CH)}$, telle que :

$$E_{Tx(CH)}(k, d_j) = k_{CH}E_{elec} + k_{CH}E_{amp}(d_j)^m \quad (4.18)$$

Le paramètre d_j étant la distance séparant deux CHs consécutivement ou un CH et la SB.

A la réception, la consommation au niveau du CH_{FILS} est de l'ordre :

$$E_{Rx(CH)}(k_{RCH}, k_{RN}) = \alpha k_{RCH}E_{elec} + (1 - \alpha)k_{RN}E_{elec} \quad (4.19)$$

Où α une variable prenant les valeurs 0 ou 1, en fonction des phases de transmission. En intra-cluster, la valeur de α vaut 0 et en inter-cluster, elle vaut 1.

En résumé, l'énergie consommée au niveau de chaque CH lors de la réception des paquets de données peut être décrite comme suite :

$$E_{Rx(CH)}(k_{RCH}, k_{RN}) = \begin{cases} k_{RCH}E_{elec} & \text{si } (\alpha = 1) \\ k_{RN}E_{elec} & \text{si } (\alpha = 0) \end{cases} \quad (4.20)$$

Ainsi, à chaque round, l'énergie totale consommée au niveau d'un NM (i) appartenant à un cluster donné (j) concerne uniquement l'énergie de transmission définie en (4.18). Elle s'écrit comme suite :

$$E_N(i, j) = k_N E_{elec} + k_N E_{amp}(d_{ij})^m \quad (4.21)$$

De la même façon, l'énergie totale consommée à chaque round, au niveau d'un CH (j) est de :

$$E_{CH}(j) = k_{CH}E_{elec} + k_{CH}E_{amp}(d_j)^m + \alpha k_{RCH}E_{elec} + (1 - \alpha)k_{RN}E_{elec} \quad (4.22)$$

Par ailleurs, le traitement de l'information par les processeurs dans les RCSF nécessite à lui seul une consommation énergétique E_{proc} de près de 15% de l'énergie global. Cette consommation est due principalement à des pertes d'énergie de commutation E_{commut} et de fuite de courant E_{fuite} . Ainsi, l'énergie consommée par un NC pendant chaque round pour le traitement d'une information d'une longueur k_N , peut s'écrire comme suite :

$$E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) = \underbrace{k_N N_{Cyc} C_{avg} V_{sup}^2}_{E_{commut}} + \underbrace{k_N V_{sup} I_0 e^{\frac{V_{sup}}{n_p V_t}} \left(\frac{N_{Cyc}}{f} \right)}_{E_{fuite}} \quad (4.23)$$

Sachant que les traitements et l'agrégation des informations sont effectuées uniquement au niveau des nœuds CHs, l'énergie dissipée pendant chaque round peut-être formulée comme suite :

$$E_{proc(CH)}(k_{CH}, k_N, N_{Cyc}) = k_{CH} E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) \quad (4.24)$$

Où N_{Cyc} est le nombre de cycles horloge, C_{avg} capacitance moyenne, I_0 courant de fuite, n_p constante dépendant du type de processeur utilisé, V_t tension thermique, V_{sup} tension d'alimentation, f fréquence du capteur et k_{CH} longueur de l'information au niveau du nœud CH.

Pour déterminer l'énergie totale consommée, à chaque round, par l'ensemble des NMs et des CHs, nous pouvons écrire :

$$E_{tot} = n_{hops} \sum_{j=1}^k \left(E_{proc(CH)}(k_{CH}, k_N, N_{Cyc}) + E_{CH}(j) + \sum_{i=1}^n E_N(i, j) \right) \quad (4.25)$$

Les paramètres n et k représentent respectivement le nombre de NMs associés à un cluster donné (j) et le nombre de clusters dans le réseau.

A partir de (4.21), (4.22) et (4.25) nous pouvons écrire :

$$E_{tot} = n_{hops}k(k_{CH}E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) + (k_{CH} + k_{RN} + \alpha(k_{RCH} - k_{RN}) + nk_N)E_{elec}) + n_{hops}k_{CH}E_{amp} \sum_{j=1}^k (d_j)^m + n_{hops}k_N E_{amp} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (d_{ij})^m \quad (4.26)$$

Comme l'illustre la figure 4.14, acheminer les données agrégées au niveau d'un CH_{FILS} vers la SB se fait directement en un seul saut et dans ce cas, le CH_{PARENT} est représenté par la SB ou relayée sur plusieurs sauts pour lesquels chaque CH_{PARENT} recevant un message de la source CH_{FILS} redevient lui-même un CH_{FILS} en routant à son tour le message jusqu'à atteindre la destination.

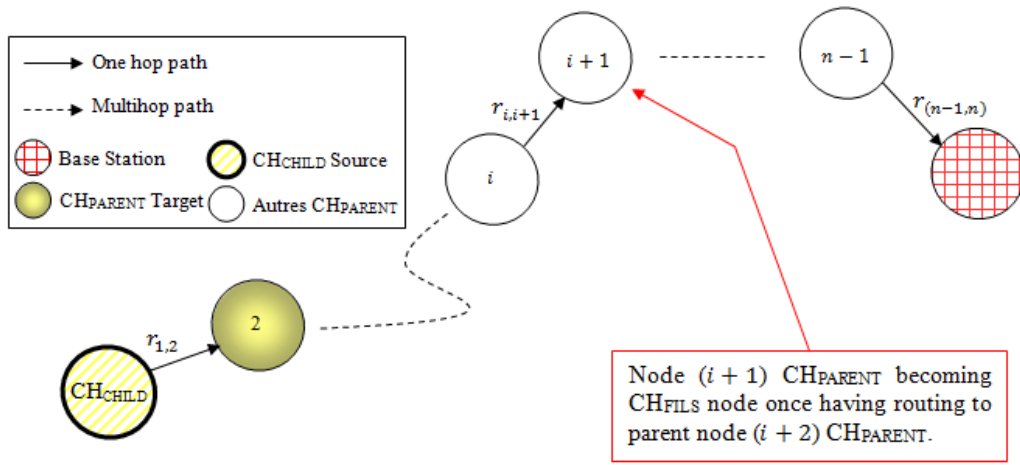


Figure 4.14 Communication multi-sauts CH_{FILS} – CH_{PARENT}

L'idée, contrairement à ce qui a été défini précédemment où le modèle de consommation considère séparément les CHs parents et la SB compliquant de ce fait l'implémentation du modèle, nous proposons, dans notre approche, un modèle dont le principe est la décomposition des distances en un ensemble de segments non linéaires et non identiques.

Le message envoyé par la source CH_{FILS} vers la cible SB via plusieurs CH_{PARENT} redevient chacun à son tour CH_{FILS} parcourt plusieurs segments de distances r_{ij} dont la distance finale peut s'exprimer de la façon suivante :

$$d_{ij} = \frac{k-1}{n_{hops}} \left(\sum_{j=1}^{k-1} r_{ij} \right) \quad (4.27)$$

Avec n_{hops} le nombre de sauts nécessaire pour acheminer un message d'un nœud CH_{FILS} vers la SB, et k , le nombre total de cluster pendant un round donné.

En remplaçant (4.27) dans (4.26), nous obtenons :

$$E_{tot} = n_{hops}k(k_{CH}E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) + (k_{CH} + k_{RN} + \alpha(k_{RCH} - k_{RN}) + nk_N)E_{elec}) + \frac{k_{CH}E_{amp}(k-1)^m}{n_{hops}^{m-1}} \sum_{j=1}^{k-1} (r_{ij})^m + n_{hops}k_N E_{amp} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (d_{ij})^m \quad (4.28)$$

On constate que l'énergie totale consommée par le réseau décrite par (4.28) comprend deux paramètres importants : le nombre de sauts (n_{hops}) et les distances (r_{ij}) séparant les CHs sources de la SB. Minimiser la consommation d'énergie revient à optimiser l'énergie totale définie en (4.28) par rapport à ces paramètres, en l'occurrence (n_{hops}) et (r_j).

En structurant l'équation (4.28) par rapport à (n_{hops}) et en supposant pour des raisons de simplification que les paquets de données sont identiques, on obtient :

$$E_{tot} = [kk_p(E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) + (1+n)E_{elec}) + k_p E_{amp} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (d_{ij})^m] n_{hops} + \frac{k_p E_{amp} (k-1)^m}{n_{hops}^{m-1}} \sum_{j=1}^{k-1} (r_{ij})^m \quad (4.29)$$

Le nombre optimal de sauts (n_{hops_opt}) peut être calculé comme suite :

$$\frac{dE_{tot}}{dn_{hops}} = 0 \left(kk_p(E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) + (1+n)E_{elec}) + k_p E_{amp} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (d_{ij})^m \right) - \frac{k_p E_{amp} (m-1)(k-1)^m}{n_{hops}^{2(m-1)}} n_{hops}^{(m-2)} \sum_{j=1}^{k-1} (r_{ij})^m \quad (4.30)$$

En remplaçant ($m=2$) dans (4.30) et en annulant cette dernière, on obtient :

$$n_{hops_opt} = \frac{(E_{amp}(k-1)^2 \sum_{j=1}^{k-1} (r_{ij})^2)}{(kk_p(E_{proc(N)}(k_N, N_{Cyc}) + (1+n)E_{elec}) + E_{amp} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (d_{ij})^2)} \quad (4.31)$$

L'équation (4.31) montre que plus le nombre de clusters est important, plus (n_{hops_opt}) est grand et donc le nœud source CH_{FILS} peut disposer de plus de choix pour router ses messages vers la cible SB via les nœuds parents CH_{PARENT}. Par ailleurs, si l'énergie nécessaire pour l'émission d'un message est du même ordre de grandeur que l'énergie de réception, particulièrement quand les distances inter-CHs r_{ij} sont courtes, la transmission sur un seul saut est souhaitable qu'un routage multi-sauts (Figure-4.15).

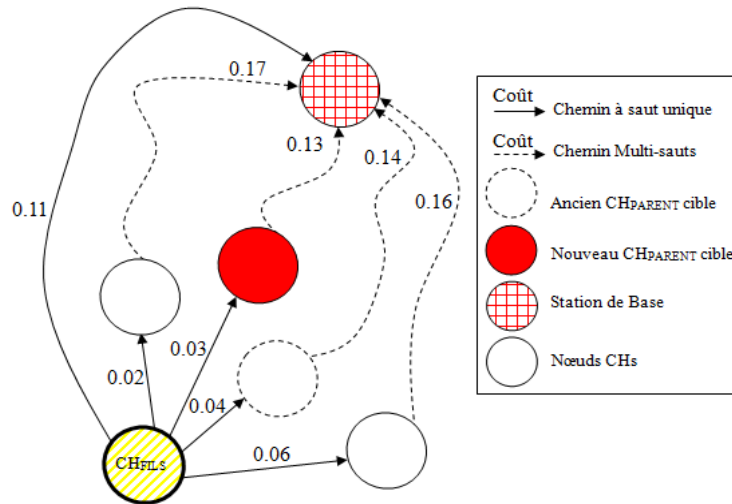


Figure 4.15 Communication multi-sauts CH_{FILS} – SB

On remarque bien que, plus les trajets sont courts plus le nombre de sauts s'accumule impliquant de ce fait plus de nœuds CH_{PARENT} pour les traitements des messages. Les coûts en termes de consommation d'énergie deviennent plus importants. Si la cible est couverte, il est préférable pour le nœud CH_{FILS} de transmettre directement vers la cible SB que de passer par plusieurs nœuds CH_{PARENT} . En effet, pour un seul saut, le coût nécessaire peut atteindre 0.11 [UdV⁷] alors que pour plusieurs sauts, le coût peut varier entre 0.13 et 0.17 [UdV]. Dans le cas contraire, il est souhaitable de choisir le meilleur chemin pour lequel le nombre de sauts est optimal, i.e. (n_{hops_opt}) (Figure-4.16).

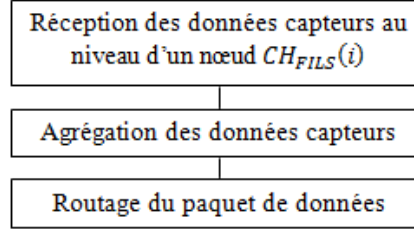


Figure 4.16 Simple routine de sélection du chemin optimal

Pour ce faire, le nœud CH_{FILS} détermine la valeur maximale de l'énergie résiduelle $E_r^{(j)}$ sur l'ensemble des nœuds CH_{PARENT} appartenant à son voisinage puis calcule un seuil énergétique $E_{r-seuil}$ devant correspondre à 20% de l'énergie résiduelle maximale.

Considérons un nœud CH_{FILS} dont les nœuds CH_{PARENT} sont au nombre de k' et supposons que le nœud $CH_{PARENT} h$ dispose de la plus grande énergie résiduelle dont la valeur se calcule de la façon suivante :

$$E_r^{(h)} = \max(E_r^{(1)}, E_r^{(2)}, \dots, E_r^{(k')}) \quad (4.32)$$

Ainsi, le seuil énergétique peut être déterminé comme suite :

$$E_{r-seuil} = (20\%)E_r^{(h)} \quad (4.33)$$

Le meilleur choix se portera sur le nœud $CH_{PARENT} h$ pour lequel l'énergie doit respecter la condition suivante :

$$(E_{r-PARENT}^{(h)} - E_{r-PARENT}^{(j)}) \geq E_{r-seuil} \quad (4.34)$$

Dans le cas contraire, la sélection portera sur le nœud CH_{PARENT} possédant un nombre de sauts (n_{hops}) égale ou plus proche de (n_{hops_opt}) déterminé par l'équation (4.31).

Pour ce faire, en supposant que le plus petit nombre de sauts pour atteindre la SB appartient au nœud $CH_{PARENT} p$, on aura :

$$dn_{hops}^{(p)} = \min(|n_{hops}^{(j)} - n_{hops_opt}|) \quad (4.35)$$

Ce pendant, si on dispose de plusieurs valeurs redondantes ($dn_{hops}^{(p)}$), le nœud source CH_{FILS} portera son critère de sélection sur la puissance maximale reçu de chacun des nœuds probables CH_{PARENT} cibles en calculant les valeurs $RSSI_{PARENT}^{(j)}$, tel que :

$$RSSI_{PARENT}^{(l)} = \max(RSSI_{PARENT}^{(1)}, RSSI_{PARENT}^{(2)}, \dots, RSSI_{PARENT}^{(k')}) \quad (4.36)$$

⁷ Unité de Valeur

Plus la valeur RSSI fourni par chacun des nœuds CH_{PARENT} cibles est grand, plus il est proche de la source CH_{FILS} . Ainsi, l'énergie dissipée sera moindre étant donné que la transmission utilise en moyenne plus de 70% de l'énergie d'un nœud capteur.

Le pseudo-code associé à la sélection du chemin optimal est illustré dans la figure 4.17.

```

FOR EACH cluster  $j$  appartenant au voisinage du nœud source  $CH_{FILS}$  tel que  $j \in [1:k']$ 
    Calculer l'énergie résiduelle maximale  $E_{r-PARENT}^{(h)}$  tel que  $h \in [1:k']$ 
    Déterminer le seuil énergétique  $E_{r-seuil}$ 
    Tester l'énergie par rapport au seuil
    IF  $(E_{r-PARENT}^{(h)} - E_{r-PARENT}^{(j)}) \geq E_{r-seuil}$ 
        | Sélection du nœud  $h$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
    ELSE
        Déterminer le nombre de sauts  $(n_{hops}^{(j)})$  de chaque nœud cible  $CH_{PARENT}$ 
        Tester la différence entre  $(n_{hops}^{(j)})$  et de  $(n_{hops\_opt})$ 
        IF une seule solution de  $dn_{hops}^{(p)}$  existe
            | Sélection du nœud  $p$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
        ELSE
            Plusieurs solutions redondantes existent
            Calculer la valeur maximale du RSSI de chaque nœud  $CH_{PARENT}$  cible
             $RSSI_{PARENT}^{(l)} = \max(RSSI_{PARENT}^{(1)}, RSSI_{PARENT}^{(2)}, \dots, RSSI_{PARENT}^{(k')})$ 
            Tester les valeurs RSSI de chaque nœud  $CH_{PARENT}$  cible
            IF  $RSSI_{PARENT}^{(l)}$  existe
                | Sélection du nœud  $l$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
            ELSE
                Plusieurs solutions redondantes existent
                Choix aléatoire du nœud  $CH_{PARENT}$  cible
            END
        END
    END
END
    
```

Figure 4.17 Pseudo-code de sélection de chemin optimal

Dans le cas d'existence de valeurs RSSI redondantes, la source CH_{FILS} procédera par un choix aléatoire sur sa cible CH_{PARENT} .

4.2 Sélection des CHs au niveau des Clusters

A chaque début d'un round r , l'architecture de communication dans le réseau évolue en fonction de l'énergie totale du réseau en tenant compte du nombre de nœuds restants en activité et de nœuds CHs formés. Dans notre approche HHRP, hormis la phase initiale de construction et de clusterisation du réseau, la formation de nouveaux clusters ainsi que l'élection des nœuds CHs correspondant obéit à un mécanisme adaptatif illustré déjà dans la figure 4.7, dans lequel plusieurs paramètres doivent être considérés à savoir, l'énergie résiduelle et la puissance des signaux reçus identifié par l'indicateur RSSI.

Deux cas de figures peuvent se présenter. Le premier concerne le fonctionnement intra-cluster où d'autres NMs peuvent prendre le relais de leur CH correspondant, et le second correspond tout simplement à une réorganisation totale du réseau. L'idée étant de limiter au maximum, comme dans le cas de LEACH ou de l'ensemble de ses variantes, les communications avec la SB. En effet, cela

permettra de diminuer le nombre de transmissions et donc une optimisation de la consommation énergétique prolongeant ainsi la durée de vie réseau.

Dans le fonctionnement intra-cluster, dans chaque cluster j , et pour chaque nouveau round r , l'élection d'un nouveau CH est réalisée par le CH du round précédent ($r - 1$) selon un critère énergétique. En d'autres termes, pour un cluster donné, un nœud membre k , (NM_k) souhaitant devenir CH pour le prochain round r doit disposer de la plus grande quantité d'énergie résiduelle. Comme l'illustre bien l'équation ci-dessous :

$$\text{Un nœud}(k) \text{ devient : } \begin{cases} CH_k^{(j,r)} & \text{si } E_{rNM_k}^{(j,r-1)} > E_{rCH_i}^{(j,r-1)} \\ NM_k^{(j,r)} & \text{si non} \end{cases} \quad (4.37)$$

D'une manière générale, un NM k , ($NM_k^{(j,r-1)}$) peut devenir Cluster-Head si son énergie résiduelle est supérieure à celle de son Cluster-Head précédent ($CH_i^{(j,r-1)}$), si non il maintient son statut en tant que NM.

Une fois les données réceptionnées au niveau du (CH_i), ce dernier détermine les énergies résiduelles de l'ensemble de ses (NM_i) avec ($i \in [1, n_j]$) et n_j étant le nombre de NM appartenant au cluster j , puis compare sa propre valeur d'énergie à celles de ses NMs comme suite :

$$\text{diff}_{E_r}^{(j,r-1)}(CH_i, NM_k) = E_{rCH_i}^{(j,r-1)} - E_{rNM_k}^{(j,r-1)} \quad (4.38)$$

Si ($\text{diff}_{E_r}^{(j,r-1)}(CH_i, NM_k) > 0$), le rôle du nœud (CH_i) sera reconduit pour le round d'après r , dans le cas contraire, le nœud ($CH_i^{(j,r-1)}$) détermine la valeur maximale des énergies résiduelles de chacun de ses NMs :

$$E_{rNM_k}^{(j,r-1)} = \text{Max} \left(E_{rNM_1}^{(j,r-1)}, E_{rNM_2}^{(j,r-1)}, \dots, E_{rNM_i}^{(j,r-1)}, \dots, E_{rNM_{n_j}}^{(j,r-1)} \right) \quad (4.39)$$

Puis vérifie la redondance des valeurs maximales $E_{rNM_k}^{(j,r-1)}$. Si aucune redondance n'existe, il attribue un nouveau statut de Cluster-Head au nœud ($NM_k^{(j,r-1)}$) pour le round d'après.

S'il existe des redondances, alors le Cluster-Head du round précédent ($CH_i^{(j,r-1)}$) détermine le probable futur CH en calculant les indicateurs RSSI de l'ensemble des NMs disposant de la même valeur maximale via la puissance des signaux reçus puis sélectionne le nœud membre dont la valeur RSSI est la plus grande.

Pour ce faire, considérons k et k' , deux NMs appartenant à un même cluster j dont l'énergie résiduelle est maximale, telle que :

$$E_{rNM_k}^{(j,r-1)} = E_{rNM_{k'}}^{(j,r-1)} \quad (4.40)$$

Sélectionner le meilleur candidat entre k et k' pour devenir CH passe par le calcul et la comparaison des valeurs RSSI correspondantes :

$$\text{diff}_{RSSI}^{(j,r-1)}(NM_k, NM_{k'}) = \left(RSSI_{NM_k}^{(j,r-1)} - RSSI_{NM_{k'}}^{(j,r-1)} \right) \quad (4.41)$$

Ainsi :

$$\begin{cases} NM_k \equiv CH \text{ si } diff_{RSSI}^{(j,r-1)}(NM_k, NM_{k'}) > 0 \\ NM_{k'} \equiv CH \text{ si } diff_{RSSI}^{(j,r-1)}(NM_k, NM_{k'}) < 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

Remarque 4.5 : *S'il existe des valeurs RSSI identiques, i.e., $diff_{RSSI}^{(j,r-1)}(NM_k, NM_{k'}) = 0$, le choix d'un nouveau nœud CH se fera de manière aléatoire. Cas très rare.*

Chaque nœud capteur, qu'il soit NM ou CH doit disposer d'une énergie de transmission suffisante pour s'assurer une contribution, minime qu'elle soit, dans le réseau. Pour ce faire, il doit disposer au minimum d'une énergie résiduelle proche d'un seuil énergétique E_{Tx} , pouvant être calculée à la base de l'équation (4.2).

En effet, en disposant des paramètres E_{elec} et $E_{Tx_{amp}}$ représentent respectivement l'énergie de transmission/réception électronique et l'énergie d'amplification, du facteur d'amplification ε_{amp} et de la tailles des paquets à transmettre, la valeur seuil peut-être déterminée par rapport à chaque nœud voisin.

A chaque round r , la comparaison suivante doit être effectuée :

$$E_{r_{noeud_i}}^{(j,r)} < E_{Tx} \quad (4.43)$$

où $E_{r_{noeud_i}}^{(j,r)}$ et E_{Tx} respectivement l'énergie résiduelle d'un nœud capteur i durant un round r et le seuil énergétique.

Ainsi, nous pouvons reformuler de la manière suivante :

$$\text{un noeud } i \text{ est : } \begin{cases} \text{exclus du réseau SI } (E_{r_{noeud_i}}^{(j,r)} - E_{Tx}) < 0 \\ \text{reconduit dans le réseau SI non} \end{cases} \quad (4.44)$$

Le processus décrit ci-dessus, s'applique au niveau de chacun des nœuds capteurs composant le réseau.

Le mécanisme de routage proposé doit tenir compte aussi du fonctionnement global du réseau et donc de l'ensemble des nœuds. L'idée de base étant d'optimiser non seulement la consommation d'énergie dans un RCSF pour maximiser sa durée de vie mais aussi de minimiser le nombre de messages échangés entre les différents nœuds, i.e., CHs et la station de base. Or, comme dans le cas de la majorité des approches de routage, la station de base intervient à chaque fin de round pour réadapter le réseau impliquant plusieurs échanges de message et donc une consommation d'énergie additionnelle due à la transmission nœuds-SB.

Pour ce faire, nous intégrons dans le mécanisme décrit dans la sous-section 3.3, une condition portant sur le temps de réorganisation du réseau par la station de base. Les changements apportés au mécanisme décrit ci-dessus sont illustrés dans la figure 4.18.

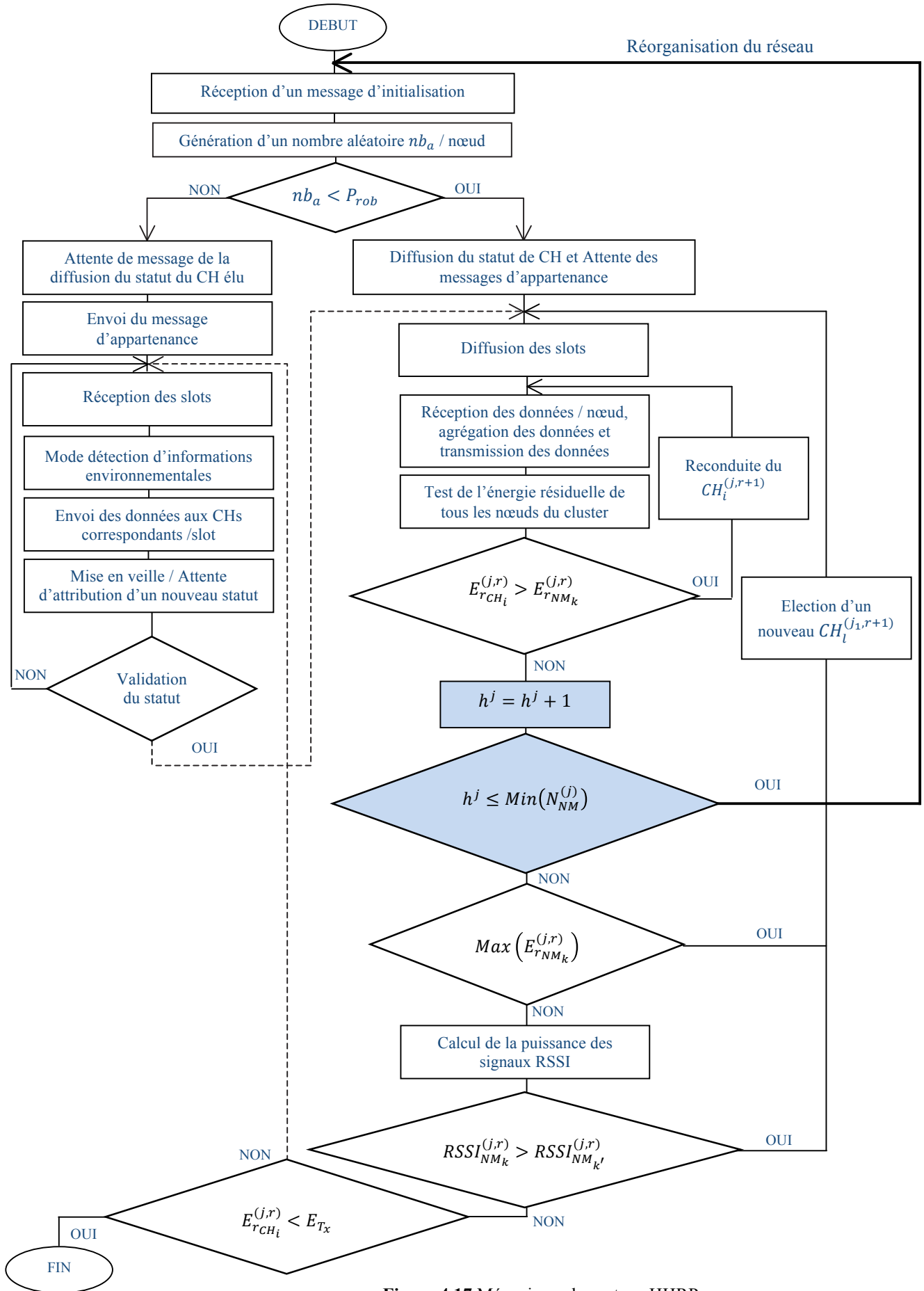


Figure 4.17 Mécanisme de routage HHRP

Une fois le nombre de cluster j est déterminé, le mécanisme sélectionne le cluster qui dispose du plus petit nombre de NMs. Pour ce faire, il calcule une valeur seuil :

$$h^j = \text{Min}(N_{NM}^{(j)}) \quad (4.45)$$

Avec $N_{NM}^{(j)}$ le nombre de nœuds membres appartenant au cluster j .

Lorsque l'ensemble des NMs du cluster j ont été sélectionnés en tant que nœuds CHs, le dernier CH alerte la SB que le cluster n'a plus la possibilité de sélectionner un nouveau nœud coordinateur. La SB commence alors à réorganiser l'architecture du réseau en régénérant une nouvelle probabilité P_{rob} et le mécanisme se relancera de lui-même en clusterisant à nouveau le réseau. Un pseudo-code simplifié correspondant à ce processus est décrit ci-dessous.

WHILE ($n_{ini} \gg 0$)

Organisation ou Réorganisation du réseau

Calcul du nombre de cluster $n_{CH} \leftarrow (10\%)n_{init}$

Génération de la probabilité P_{rob}

Diffusion du message d'initialisation $Message_{Init_{SB}}(ID_{N_i}, ID_{N_j}, P_{rob}, N_{hops})$

IF un NC(i) reçoit un $Message_{Init_{SB}}$

Incréméntation du nombre de sauts : $N_{hops} \leftarrow N_{hops} + 1$

Construction des tables de routage temporaires

Génération d'un nombre aléatoire nb_a

Test sur la probabilité d'élection

IF ($nb_a \leq P_{rob}$)

NC(i) se propose d'être un nœud CH

NC(i) alerte la SB via un message $Message_{Adv_CH}(ID_{CH_i}, ID_{SB}, header)$ de son nouveau statut en tant que nœud CH

NC(i) devient CH ($NC(i) \leftarrow CH_i$)

Le nouveau nœud CH_j alerte son voisinage en diffusant le message type

$Message_{Adv_CH}(ID_{CH_j}, ID_{N_i}, header)$ pour construire son cluster

Pour Chaque (NM_i) ($i = 1:n$)

IF (NM_i) reçoit plusieurs $Message_{Adv_CH}$

Calcule la puissance des signaux $RSSI_{CH_j}^{(i)}$ ($j = 1:k$)

Compare les valeurs RSSI

IF ($RSSI_{CH_h}^{(i)} = RSSI_{CH_l}^{(i)}$)

Sélectionne la plus petite valeur de (N_{hops})

Envoyer $Message_{Join_REQ}(ID_{MN_i}, ID_{CH_j}, header)$

ELSE Compare le nombre de sauts ($N_{hops_{CH_j}}^{(i)}$)

IF ($N_{hops_{CH_h}}^{(i)} = N_{hops_{CH_l}}^{(i)}$)

Sélection aléatoire de (CH_j)

END

END

END

END

NC(i) devient NM appartenant au cluster j ($NC(i) \leftarrow NM_i^{(j)}$)

ELSE

NC(i) garde son statut de nœud ordinaire

END

END

Pour chaque cluster j avec $j \in [1:k']$

Trouver le cluster minimal par calcul du nombre de rounds intermédiaires : $h^j = \text{Min}(N_{NM}^{(j)})$

1

2

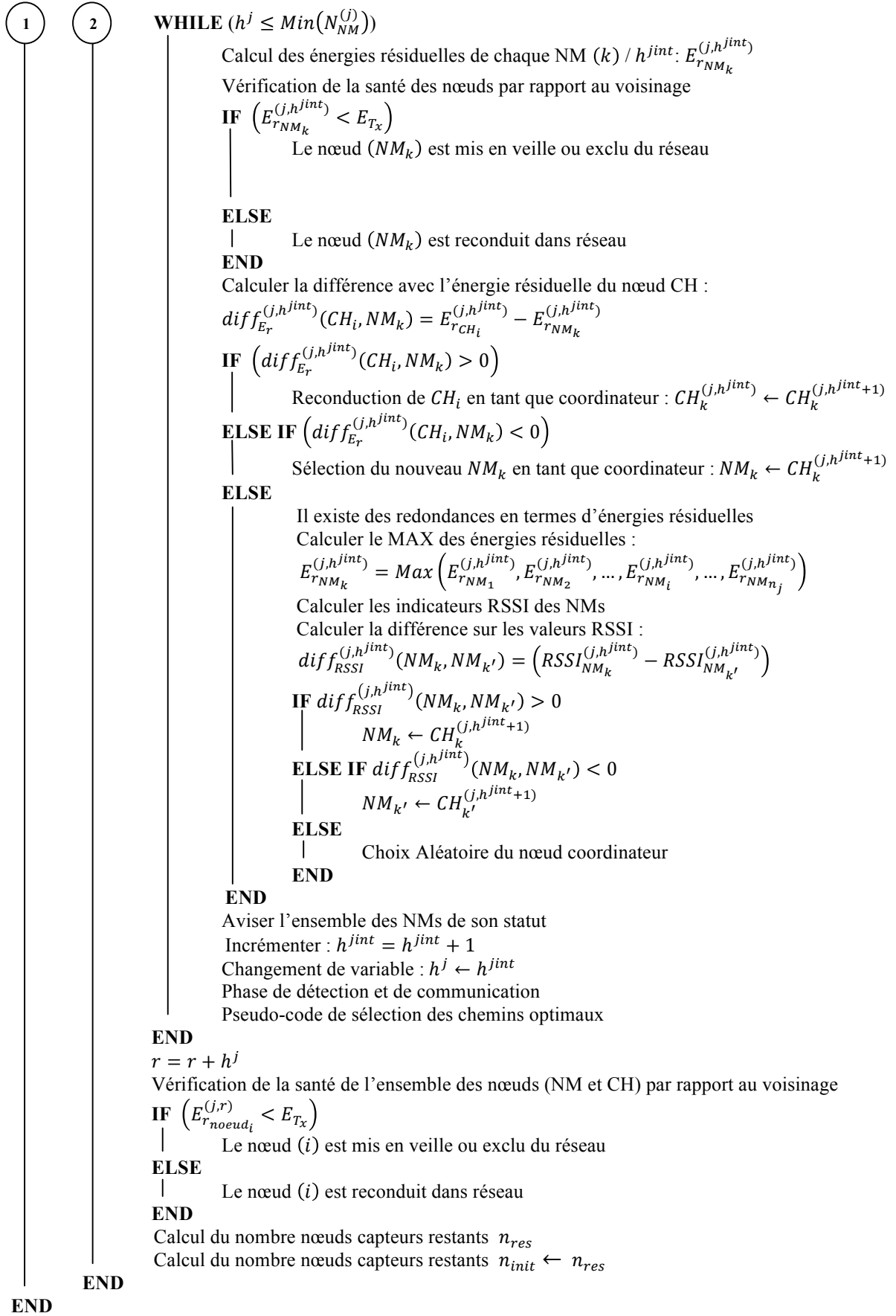


Figure 4.18 Pseudo-code du mécanisme de routage HHRP

Avec comme paramètres d'initialisation :

SB	: Station de Base
ID_{N_i}	: Identifiant d'un nœud source N_i
ID_{N_j}	: Identifiant d'un nœud destination N_j
N_{hops}	: Profondeur d'un nœud par rapport à la SB
$N_{NM}^{(j)}$	: Nombre de nœuds membres appartenant au cluster j
ID_{CH_i}	: Identifiant d'un nœud source CH_i
ID_{SB}	: Identifiant de la station de base SB
E_{elec}	: Energie de transmission/réception électronique
E_{Txamp}	: Energie d'amplification
ε_{amp}	: Facteur d'amplification
(i, j)	: Indice nœud capteur (NC) et indice cluster
Round $r \leftarrow$ NULL	
Round intermédiaire $h^{int} \leftarrow$ NULL	
Nombre de nœuds $n \leftarrow n_{init}$	

4.4 Evaluation des performances

Dans cette première partie du chapitre, nous avons proposé une approche de routage hiérarchique HHRP basée sur un mécanisme de clusterisation dynamique qui tient compte des différents états du réseau. L'objectif étant d'apporter des améliorations significatives en termes de minimisation de la consommation énergétique, d'optimisation des ressources et donc prolongation de la durée de vie du réseau. L'approche HHRP repose sur trois phases principales : une phase de déploiement, d'initialisation et de reconnaissance du réseau dans laquelle des nœuds capteurs avec des caractéristiques bien définies et spécifiques au type d'application sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel, une phase de clusterisation dynamique qui tient compte des différents états du réseau et une phase de communication dans laquelle un concept de communication mono ou multi-sauts FILS-PARENT est proposé pour optimiser les chemins et les délais d'acheminement des paquets source-destination.

La mise en œuvre du protocole HHRP passe par les postulats suivants :

- Le réseau se compose de n nœuds homogènes distribués aléatoirement et pouvant communiquer avec la station de base sur un seul ou plusieurs sauts.
- Le modèle de consommation d'énergie des nœuds est décrit par les équations (4.17), (4.18), (4.19) et (4.20).
- Pendant un certain nombre de round correspondant par exemple au nombre de NMs appartenant au cluster minimal, la station de base procède par une réorganisation et une clusterisation complète du réseau en élisant de nouveaux CHs.
- Deux techniques d'accès à la couche MAC sont utilisées : TDMA et CSMA/CA afin d'éviter les collisions des signaux radio lors de la communication intra- et inter-CHs.
- L'échange d'information intra-CH et inter-CHs s'effectue respectivement en un seul saut et en multi-sauts.
- Les nœuds peuvent se mettre en mode veille pour économiser l'énergie.
- A chaque round, les nœuds CHs peuvent élire de nouveaux coordinateurs selon plusieurs critères : Energie résiduelle et puissance du signal reçu RSSI.

Afin de permettre l'évaluation des performances du protocole de routage proposé, nous avons réalisé une étude comparative avec le protocole standard LEACH. Pour ce faire, nous nous basons sur

plusieurs métriques : la consommation d'énergie, le délai d'acheminement de l'information bout-en-bout et le nombre de messages échangés.

1. Plateforme de travail

Afin de montrer ses performances, nous avons réalisé une série de simulations et de simulations sur une plateforme open source dédiée pour des applications embarquées type RCSF appelée : TinyOS⁸ pour laquelle nous greffons des simulateurs TOSSIM⁹, PowerTOSSIM¹⁰ et une interface graphique TinyViz¹¹ [148-150]. La partie développement porte sur un langage de programmation orienté composants, syntaxiquement proche du langage C, le *NesC* [151]. Cela offre la possibilité de réduire drastiquement la taille mémoire du système et de ses applications, i.e., composants. Son exploitation nécessite trois modules : les interfaces, le module configuration et les composants. Quelques routines écrites en NesC sont illustrées en annexe-A.

La version TinyOS utilisée est basée sur la 2.x installée sur un OS type GNU/LINUX avec un ensemble de packages à télécharger.

Le modèle capteur est de type Mica2 de Crossbow comprenant un microcontrôleur faible puissance ATmega128L et un module radio CC2420. Il dispose aussi de deux mémoires flash de 512 et 128Kbytes respectivement pour stocker les mesures et le programme. La communication radio utilise le protocole ZigBee pouvant atteindre une portée allant de trente mètres dans un environnement clos à une centaine de mètres dans un environnement extérieur. Quelques spécificités sont illustrées dans la figure 4.17.



- 2.4 GHz for enabling low-power WSN
- IEEE 802.11.4 compliant Radio frequency transceiver
- 51-pin expansion connector
- High speed (250Kbps)
- Hardware security (AES-128)

Figure 4.17 Capteur Mica2 avec spécifications

Le module sensoriel MTS400CA comprend un ensemble de capteurs permettant de récupérer des informations type accélération, pression atmosphérique, lumière ambiante, température et humidité.

2. Résultats obtenus

La communication entre les différents NC se base sur une politique d'ordonnancement des messages via un modèle de propagation radio pour lequel la mise en œuvre d'applications RCSF passe par une optimisation des ressources et de consommation d'énergie. Les performances de l'approche de routage proposée HHRP ont été évaluées sur la base de critères de consommation d'énergie et de la charge du réseau en termes de nombre de messages échangés en inter-CHs et intra-CH.

Plusieurs simulations ont été conduites en tenant compte de plusieurs paramètres intrinsèques aux capteurs eux même et de la densité du réseau. Pour ce faire, nous avons considéré six types de réseaux avec des densités de 20, 50, 100, 150, 200 et 500 NC. Afin de montrer l'apport de l'approche HHRP pour la maximisation de la durée de vie des différents réseaux, aucune contrainte n'est spécifiée sur les délais de simulation. Les paramètres de simulation sont illustrés dans le tableau 4.1.

⁸ Tiny-Operating System

⁹ TinyOS-SIMULATOR

¹⁰ Power-TinyOS-SIMULATOR

¹¹ Application graphique illustrant les échanges en temps réels

Paramètres de simulation [unités]	Valeurs
Surface environnementale [m^2]	100×100
Densités n	20, 50, 100, 150, 200, 500
Positionnement de la SB [m, m]	(0,0)
Portée radio [m]	25
E_{elec} [nJ/bit]	50
$d_{crossover}$ [m]	50
$\varepsilon_{fs} \left[\frac{nJ}{bit} / m^2 \right]$	1.29×10^{-15}
$\varepsilon_{tr} \left[\frac{nJ}{bit} / m^4 \right]$	0.1×10^{-10}
k_{CH} [octets]	29
k_N [octets]	29
k_{RCH} [octets]	29
k_{RN} [octets]	29
Perte d'un chemin m	2, 4
Energie initiale [Joules]	20
n_{CH}	(10%) n
$Offset_{RSSI}$ [dBm]	-45

Tableau 4.1 Paramètres expérimentaux

Les performances de la solution HHRP sont évaluées par rapport aux approches de routage LEACH et TEEN. Ce dernier protocole, contrairement à LEACH qui est un protocole proactif, est un protocole réactif qui se base sur les événements, en d'autres termes, le processus de routage est réactif que si des événements liés à des informations critiques sont détectées par des NC puis transmises vers les nœuds coordinateurs CH.

Chaque CH diffuse un message comprenant un attribut représentant les tâches demandées aux NC, une valeur soft threshold st et une valeur hard threshold ht .

Lorsqu'un NC détecte une information dont la valeur est supérieure à ht , cette information sera transmise tout simplement puis sauvegardée dans une variable interne sv . Ainsi, le NC n'émet son information vers son CH que si ($sv > ht$) et ne peut réémettre que si ($sv - ht > st$).

Ce protocole permet d'optimiser le nombre de messages à transmettre et donc économiser de l'énergie, un des critères décisif permettant d'apprécier les performances des solutions de routage proposées.

Les résultats obtenus montrent bien que la solution protocolaire proposée présente de meilleures performances comparativement aux protocoles LEACH et TEEN (Figure-4.18). L'énergie totale consommée par l'ensemble des réseaux considérés évolue de manière significative et différente au fur

et à mesure que le fonctionnement perdure dans le temps. On constate que la solution protocolaire proposée HHRP assure une meilleure optimisation énergétique que les autres variantes vu que le processus de relance et de réorganisation du réseau est moins sollicité. En effet, contrairement à LEACH et TEEN, la solution HHRP optimise les transmissions radio pour la constitution des clusters, ces derniers ne sont régénérés qu'au bout d'un certain seuil h correspondant au nombre de NM appartenant au cluster j dont la densité est minimal défini par le paramètre h^j . Ainsi, la longévité du réseau se retrouve améliorée.

Si l'on considère que les performances d'un RCSF ne peuvent être assurées après la perte de 50% de l'énergie totale, alors à titre d'exemple pour un réseau à 50 NC, avec une énergie moyenne de 20 Joules, la solution HHRP prolonge la durée de fonctionnement du réseau de 4 et 6 rounds respectivement par rapport à TEEN et LEACH.

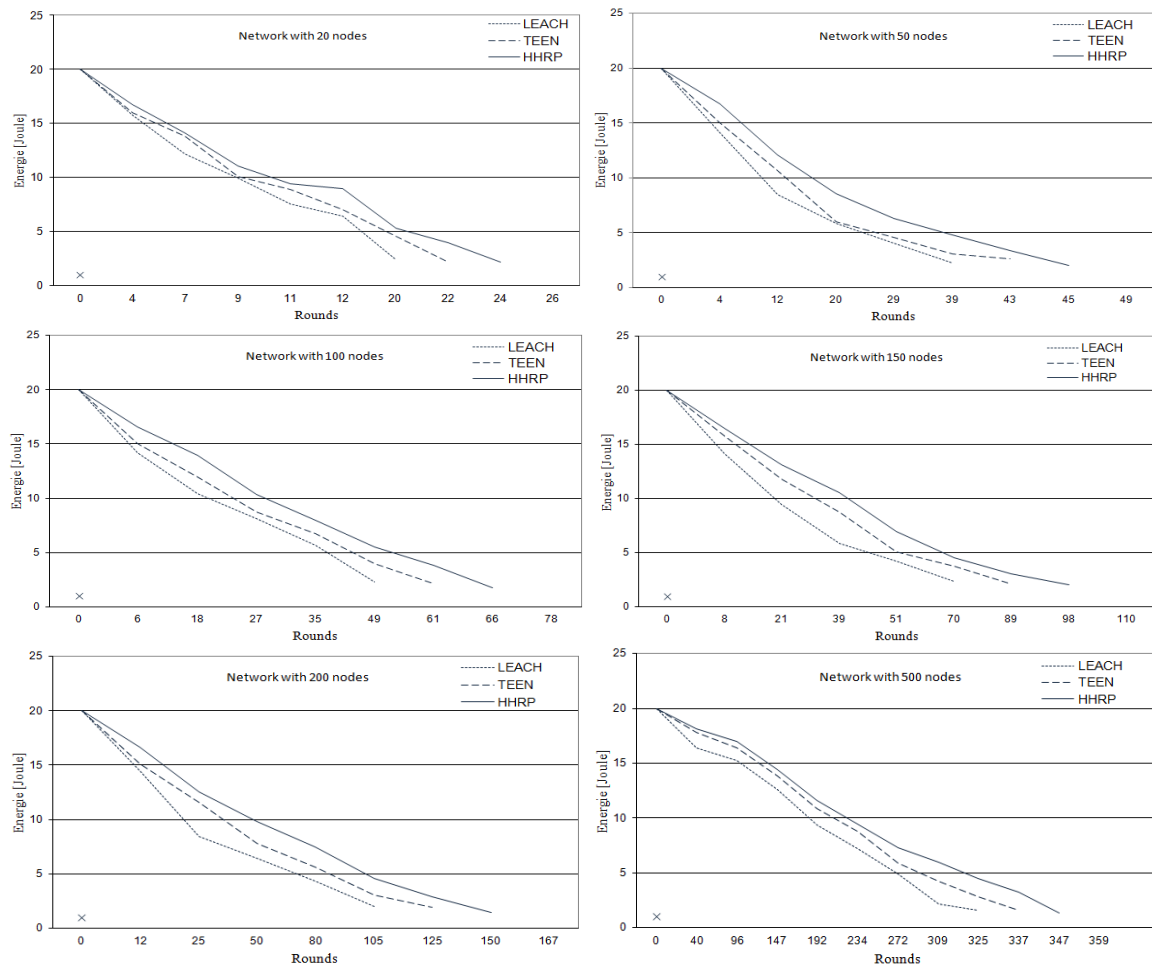


Figure 4.18 Energie résiduelle dans les différents RCSF

On constate aussi que plus le réseau est dense plus le gain énergétique est important, et la mise en œuvre des réseaux à 200 et à 500 NC attestent de cela. En effet, la solution HHRP prolonge la durée de fonctionnement du réseau à 200 NC de 13 et 27 rounds respectivement par rapport à TEEN et LEACH et de 23 et 40 rounds pour un réseau à 500 NC.

Par ailleurs, le concept de communication Fils-parent proposé dans HHRP permettant la sélection des meilleurs chemins pour acheminer les données vers la cible optimise significativement la consommation d'énergie. Etant donné que la radio et le traitement de l'information CPU¹²

¹² Central Processing Unit

consommant plus de 70% de la consommation énergétique, et que la solution HHRP considère aussi l'énergie liée à la formation des clusters, les pertes en termes d'énergie sont faibles (Figure-4.19).

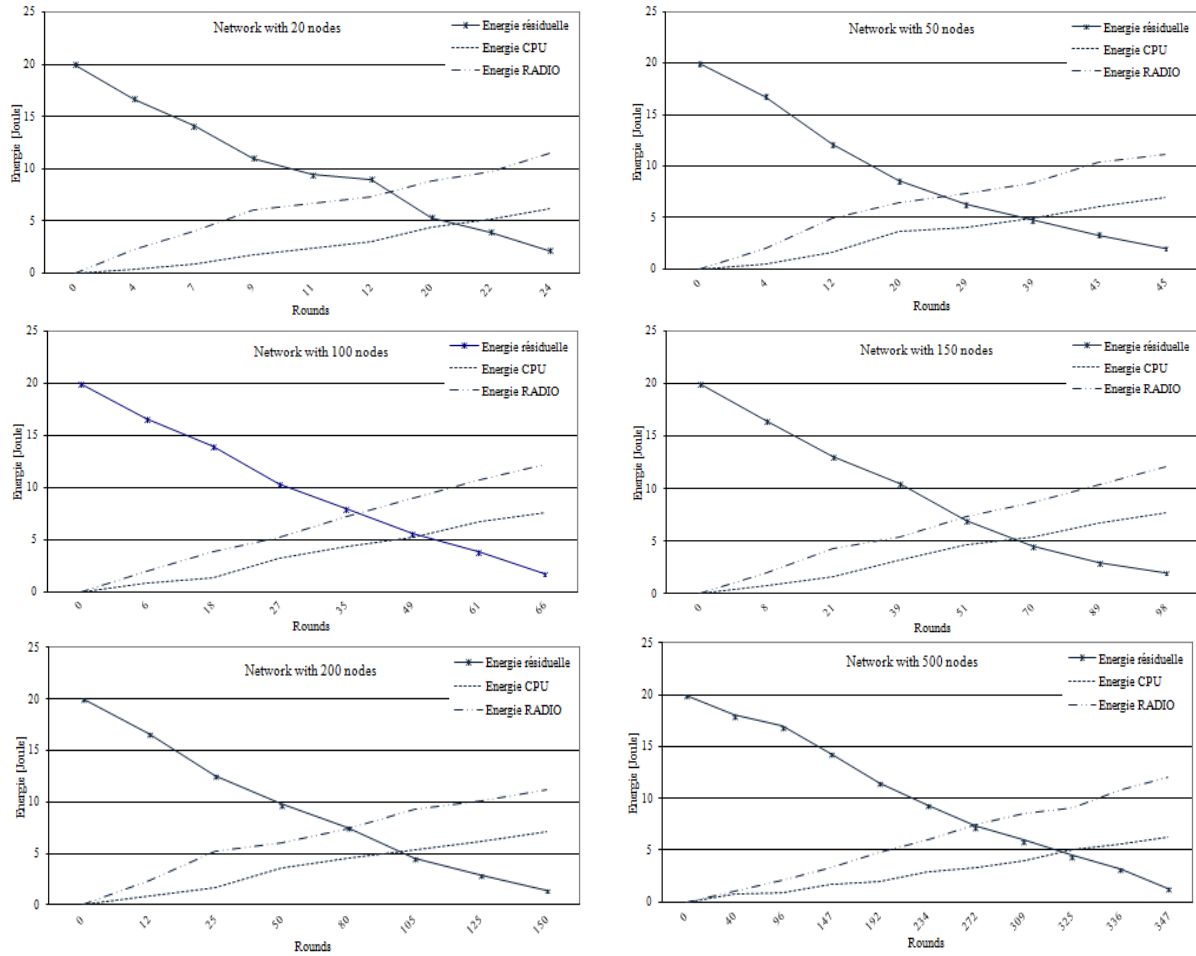


Figure 4.19 Energie résiduelle vs. Radio et CPU

Dans notre mise en œuvre, la formulation de l'énergie résiduelle peut être illustrée comme suite :

$$E_{Residuelle} = E_{Totale} - (E_{Radio} + E_{CPU} + E_{Annexe}) \quad (4.46)$$

Avec E_{Annexe} correspondant à l'énergie consommée lors des transitions, détection et mémorisation des données. Cette grandeur annexe comme l'illustre les résultats de la figure 4.19 est très faible, elle atteint en moyenne 5% de l'énergie totale.

Les résultats obtenus et illustrés dans la figure 4.20 montrent clairement les performances de la solution HHRP. En fonction de la densité du réseau et de l'approche qui est mise en œuvre, le nombre de NC vivants décroît dans le temps de manière différente. A titre d'exemple, pour un réseau à 50 NC, la solution HHRP arrive à prolonger la durée de vie d'un round et 5 rounds respectivement par rapport à TEEN et LEACH. Plus le réseau est dense plus il perdure dans le temps. En effet, si l'on considère le réseau à 100 NC, la durée de vie est prolongée de 5 et 17 rounds, et pour un réseau à 500 NC le gain est de 12 et 23 rounds.

On remarque aussi que dans le cas de HHRP, la perte des nœuds commence tardivement par rapport à LEACH et TEEN. Pour un RCSF à 20 nœuds, la disparition des premiers nœuds arrive au bout du 6^{ème} round et au 15^{ème} round pour un RCSF à 500 nœuds. Cela prouve que le mécanisme de communication Fils-Parent implémenté arrive à s'adapter globalement en fonction de la situation du

réseau, et particulièrement à l'état de chaque NC d'un point de vue énergétique et positionnement dans son environnement.

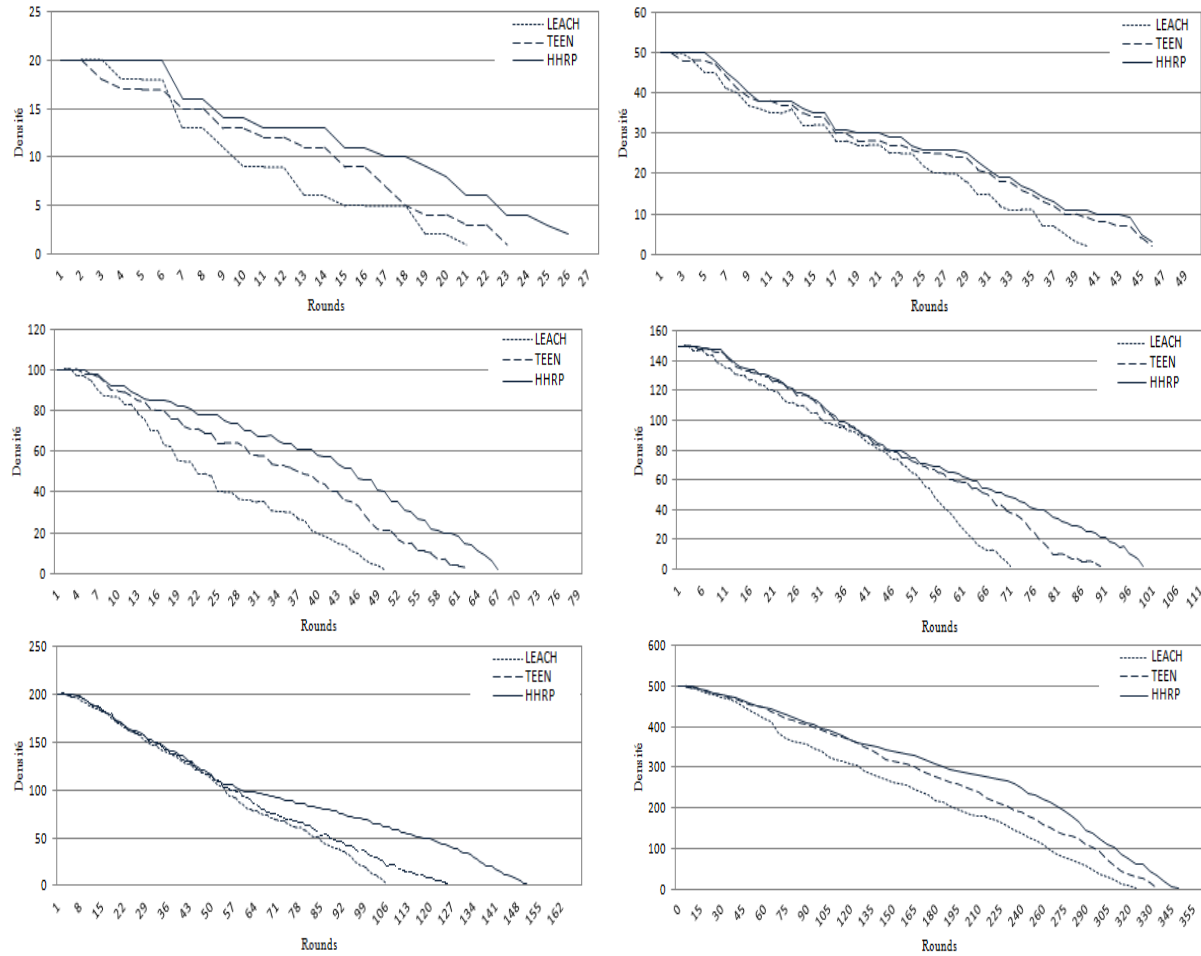


Figure 4.20 Longévité des réseaux

Une fois l'ensemble des NMs du cluster j ait été sélectionné en tant que CHs, le dernier CH alerte la SB que le cluster n'a plus la possibilité de sélectionner un nouveau nœud coordinateur. La SB commence la réorganisation de l'architecture du réseau en générant une nouvelle probabilité P_{rob} puis le mécanisme se relance de lui-même en clusterisant à nouveau le réseau. La figure 4.21 illustre ce processus de clusterisation pour deux réseaux de 20 et 50 NC dans le temps.

Dans le cas du réseau à 20 NC, on remarque bien que le processus de clusterisation débute avec 3 CHs prouvant ainsi que la SB applique la règle des 5-15% pour l'initialisation du nombre de clusters. Au bout de 30% de perte de nœuds, le nombre de clusters se stabilise autour de 2 CHs pour atteindre après 60% de perte 1 seul cluster. De la même façon, le réseau à 50 NC commence à opérer avec 6 CHs pour atteindre 4 CHs au bout de 12 rounds, continuant à décroître en fonction de la perte des NCs. On constate qu'au round 43 où le réseau perd plus de 90% de ses capteurs il demeure tout de même un cluster. Ce processus continu à tourner jusqu'à l'épuisement du réseau, et les résultats illustrés dans la figure 4.22, permettent d'éclairer cela.

RCSF à 20 NC

RCSF à 50 NC

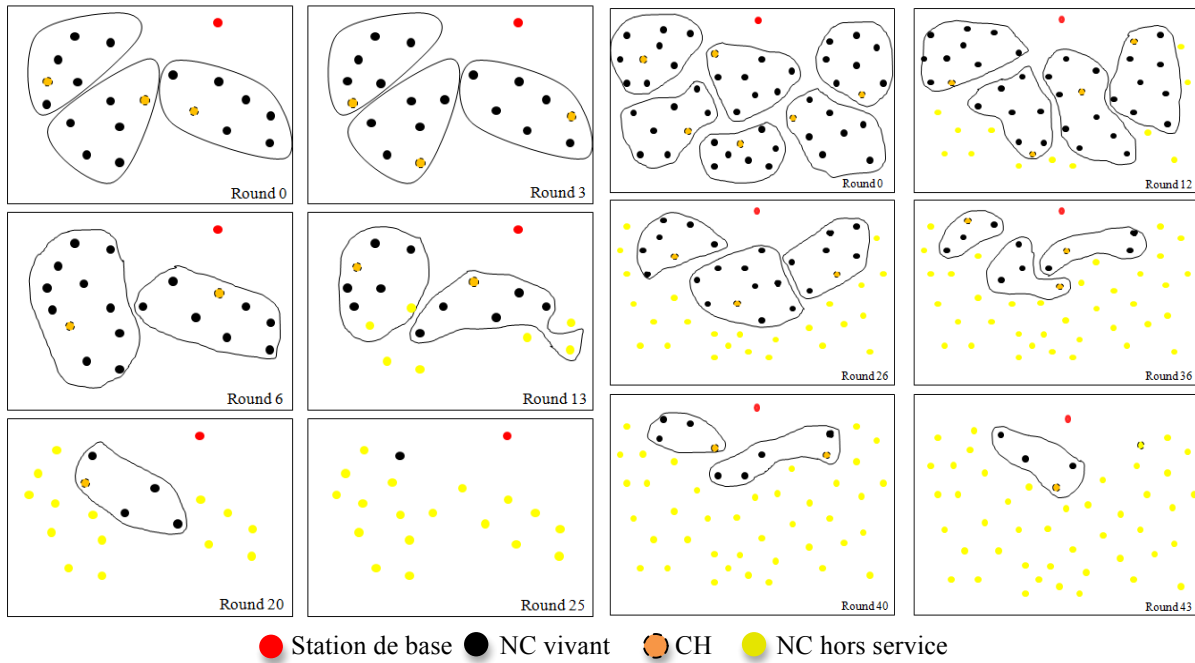


Figure 4.21 Evolution de la topologie

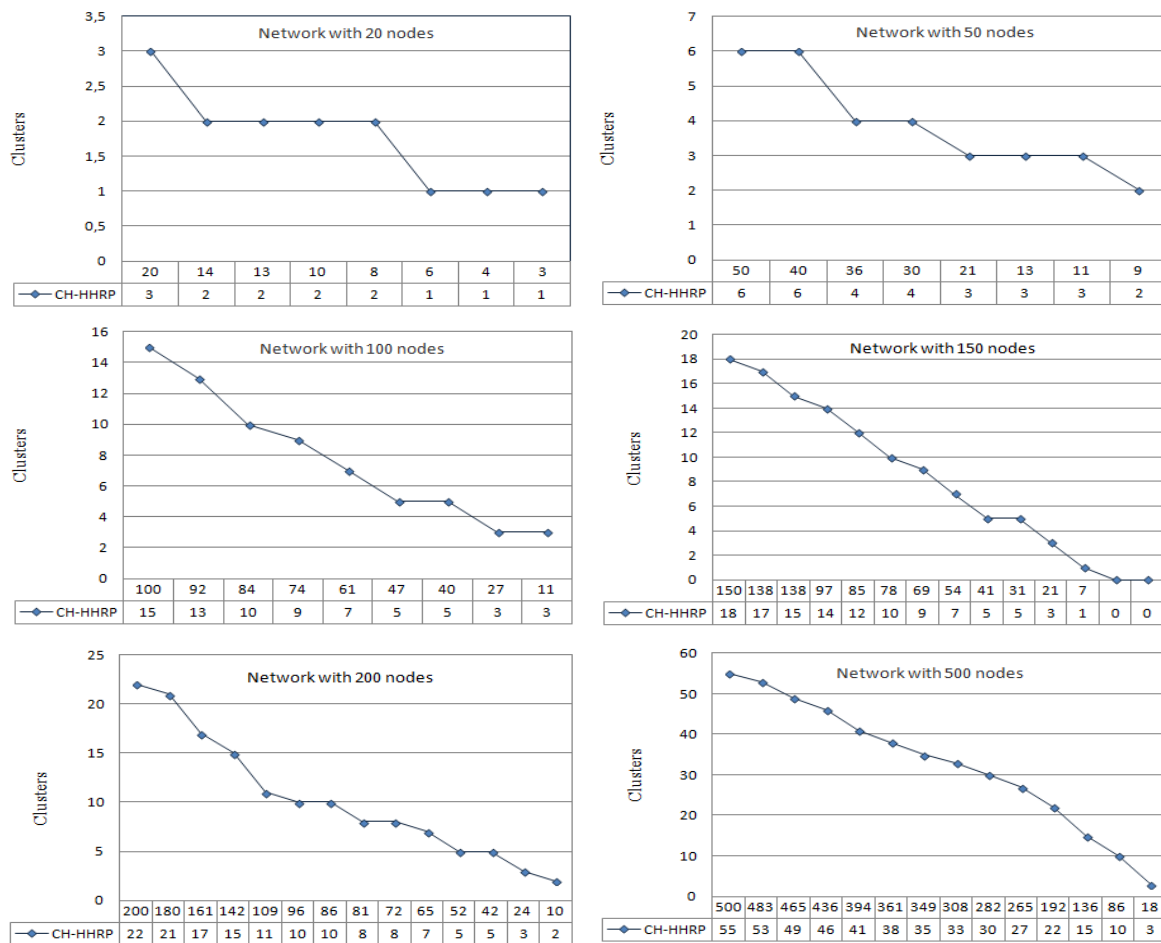


Figure 4.22 Nombre de clusters vs. Densité

La mise en œuvre de la solution HHRP passe dans un premier temps par une organisation du réseau en petits groupes indépendants et pouvant communiquer localement en intra-cluster ou entre eux

directement sur un seul ou plusieurs sauts en inter-clusters. L'idée étant de déterminer des compromis de communications courtes et longues distances et d'équilibrer la consommation énergétique entre les différents NC et donc prolonger la durée vie du RCSF. En se basant sur les résultats fournis par la solution proposée HHRP comparativement à LEACH et à TEEN, on constate que le concept de transmission FILS-PARENT permet une meilleure optimisation d'énergie et utilisation des ressources. En effet, la mise à contribution de plusieurs CHs permet une uniformisation et homogénéisation de la dépense énergétique sur l'ensemble du réseau.

4.5 Analyse critique et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche de routage hiérarchique HHRP basée sur un mécanisme de clusterisation adaptative permettant d'apporter des améliorations significatives en termes de minimisation de la consommation énergétique, d'optimisation des ressources et donc prolongation de la durée de vie du réseau. Cette approche repose sur trois phases principales : une phase de déploiement, d'initialisation et de reconnaissance du réseau dans laquelle des nœuds capteurs avec des caractéristiques bien définies et spécifiques au type d'application sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel, une phase de clusterisation adaptative qui tient compte des différents états des NC et une phase de communication dans laquelle un concept de communication mono ou multi-sauts FILS-PARENT est proposé pour optimiser les chemins et les délais d'acheminement des paquets source-destination.

Contrairement au protocole standard LEACH, où les nœuds sélectionnent à plusieurs reprises leurs clusters d'appartenance, dans HHRP, le nœud sélectionne le CH ayant une énergie maximale par l'envoi d'un seul message. Cette procédure de sélection de nouveaux nœuds coordinateurs ne passe pas par la station de base, elle se fait directement au niveau de chaque cluster. L'ancien CH sélectionne le nouveau CH à la fin de chaque round en fonction de son niveau énergétique dans un premier temps si non, en fonction de la puissance du signal reçu si le cas l'exige. Les résultats de simulation obtenus montrent que l'approche de routage proposée HHRP est plus performante que ceux du protocole standard LEACH et TEEN. A titre d'exemple, le nombre de messages échangés entre les différents NMs et les CHs est nettement inférieur dans HHRP que dans LEACH standard et TEEN impliquant ainsi une consommation énergétique moins importante. Il en est de même pour le nombre de nœuds inactifs qui est strictement inférieur dans HHRP. Ces résultats traduisent aussi une meilleure répartition de la charge et une meilleure optimisation des ressources dans le réseau maximisant ainsi sa longévité.

Le mécanisme de routage proposé utilise plusieurs métriques : l'énergie consommée, la charge dans le réseau, le délai d'acheminement des données, la puissance du signal matérialisée par le RSSI. La métrique basée sur le calcul des valeurs RSSI intervient non seulement dans les phases de reconnaissance et de clusterisation mais aussi dans la construction des chemins optimaux selon le concept FILS-PARENT. L'avantage est que la technologie RSSI est très répandue dans la majorité des plateformes RCSF d'une part, et peu coûteuse en énergie d'autre part. Ainsi, comparativement au protocole de routage LEACH, les résultats obtenus avec HHRP sont plus intéressants.

Or, dans les RCSF, les liaisons de communication sont asymétriques et étant donné que la puissance des signaux radio se mesure à la réception, cela peut engendrer des dégradations des performances du mécanisme de routage proposé et des erreurs d'estimation des valeurs RSSI. Ces dernières ne sont exploitables pour la localisation de nœuds qu'au bout d'un certain temps vu que la stabilité du signal n'est garantie que tardivement. Ainsi, le temps alloué pour la phase de reconnaissance devient important, accélérant de ce fait la consommation d'énergie et donc minimiser la durée de vie du réseau.

Tenant compte de l'ensemble des remarques relevées ci-dessus, et afin d'améliorer les performances du mécanisme de routage HHRP, nous proposons, dans le cinquième chapitre, une

approche de routage hybride basée sur un mécanisme de clusterisation dynamique HRP-DCM¹³, permettant d'apporter des modifications non seulement sur la phase de reconnaissance du réseau mais aussi sur l'optimisation des chemins lors de la phase de communication.

¹³ Hybrid Routing Protocol based on Dynamic clustering Method

Chapitre 5

HRP-DCM : Routage Hiérarchique Hybride à base d'une clusterisation dynamique du réseau

Dans ce chapitre, nous proposons une alternative à base d'un protocole hybride HRP-DCM¹ qui permet d'apporter des améliorations à tous les niveaux, de la phase de reconnaissance du réseau jusqu'à la phase d'optimisation des chemins lors des échanges d'informations.

5.1 Introduction

Comparativement à TEEN ou à LEACH, l'implémentation de l'approche de routage HHRP basée sur un mécanisme de clusterisation dynamique améliore significativement les performances du RCSF en termes de minimisation de la consommation énergétique, d'optimisation des ressources et donc prolongation de la durée de vie du réseau. Cependant, l'utilisation de mesures RSSI à tous les niveaux du mécanisme, i.e., reconnaissance du voisinage, clusterisation et construction des chemins optimaux selon le concept FILS-PARENT, peut engendrer des dégradations dans le réseau vu l'asymétrie des liaisons de communication. Par ailleurs, les informations ne peuvent être exploitées qu'au bout d'un certain temps lié à la stabilisation du signal RSSI. Ainsi, le temps alloué pour la phase de reconnaissance des voisins devient important, accélérant de ce fait la consommation d'énergie et donc amoindrir la durée de vie du réseau.

Plusieurs méthodes permettant d'améliorer la qualité de la localisation ont été développées puis implémentées pour la mise en œuvre d'applications type RCSF [151]. Ces méthodes utilisent des mesures types angles d'arrivée AOA² pour situer un objet dans son environnement opérationnel, ou d'autres mesures comme TOA³ et TDOA⁴ qui se basent sur les temps de vol d'informations d'une source vers une destination. Ces deux dernières offrent une très bonne précision de calcul des distances vu la largeur de la bande passante.

Dans notre étude, nous proposons une solution protocolaire HRP-DCM qui utilise le concept de calcul des distances temporelles lors de la phase de reconnaissance du voisinage. L'objectif étant de raccourcir les délais alloués à la phase d'initialisation du réseau et donc atténuer la consommation énergétique.

¹ Hybrid Routing Protocol based on Dynamic Clustering Method

² Angle Of Arrival

³ Time Of Arrival

⁴ Time Difference Of Arrival

5.2 Mécanisme de routage HRP-DCM

Le mécanisme HRP-DCM est une amélioration de HHRP qui contourne entre autre les problèmes d'asymétrie des liaisons de communication. Sa mise en œuvre passe par quatre phases importantes pour assurer un échange d'informations sur la base de critères d'optimalité, à savoir, la consommation d'énergie, l'utilisation des ressources et les délais d'acheminement de l'information source-cible. On peut citer la reconnaissance du voisinage, la clusterisation, l'attribution des slots et enfin la communication où, des routes optimales sont construites selon le concept FILS-PARENT [152-156].

1. Reconnaissance du voisinage

Une fois déployés aléatoirement dans l'environnement opérationnel, la découverte des voisins s'effectue par un échange de messages entre les différents NC. Chaque nœud $N_i \in H_s$ (H_s ensemble de départ) broadcaste un message incluant son identifiant ID pour l'ensemble des nœuds voisins L_s (ensemble d'arrivée) afin que ces derniers reconnaissent leur voisinage immédiat. Le message est de la forme :

$$Message_{init_{SB}}(ID_{N_i}, ID_{N_j}, P_{rob}, N_{hops}, \Delta T_{H_s}^{(N_i)}) \quad (5.1)$$

Avec $\Delta T_{H_s}^{(N_i)}$ la variation temporelle lors de l'émission d'un message type $Message_{init_{SB}}$, tel que :

$$\Delta T_{H_s}^{(N_i)} = T_{H_s}^{(N_i)} - T_0 \quad (5.2)$$

Avec T_0 et $T_{H_s}^{(N_i)}$ respectivement la valeur initiale du *TIMER* et le temps correspondant au moment de l'émission du message $Message_{init_{SB}}$ par le nœud N_i .

Chaque capteur de l'ensemble d'arrivée N_j peut alors construire une table de routage en authentifiant ses voisins les plus proches par leurs identifiants respectifs ID_{N_i} et leur profondeur par rapport à la SB N_{hops} incrémentée de 1 en implémentant un mécanisme de calcul du temps de vol source/cible (Figure-5.1). De la même façon, un nœud capteur N_j appartenant à l'ensemble d'arrivée L_s réceptionnant le même message, devra calculer dans un premier temps, la variation temporelle :

$$\Delta T_{L_s}^{(N_j)} = T_{L_s}^{(N_j)} - T_0 \quad (5.3)$$

Avec $\Delta T_{L_s}^{(N_j)}$ et $T_{L_s}^{(N_j)}$ respectivement la variation temporelle lors de la réception du message $Message_{init_{SB}}$ et le temps correspondant au moment de sa réception par le nœud ordinaire N_j .

Puis à son tour, le nœud capteur N_j broadcaste vers l'ensemble des nœuds voisins, même pour ceux figurant déjà dans sa table de routage, le message $Message_{init_{SB}}$.

Contrairement à l'approche HHRP qui utilise la puissance des signaux radio pour l'estimation de la distance entre NC, et dans laquelle des phénomènes d'asymétrie des liaisons de communication existent et donc pouvant dégrader les performances du mécanisme de routage, l'approche HRP-DCM permet de contourner cette problématique. Par ailleurs, les données RSSI ne peuvent être exploitables que si elles sont stables augmentant le temps alloué à la phase de traitement et de calcul. A partir de (5.2) et (5.3), on détermine la différence :

$$diff_{ij} = \Delta T_{L_s}^{(N_j)} - \Delta T_{H_s}^{(N_i)} = T_{H_s}^{(N_j)} - T_{L_s}^{(N_i)} \quad (5.4)$$

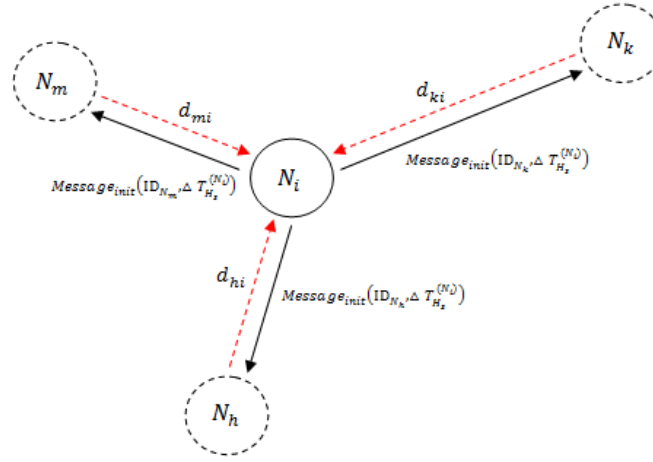


Figure 5.1 Mécanisme de calcul des distances

Connaissant la fréquence radio d'émission, la longueur des messages émis et à partir du paramètre $diff_{ij}$ représentant le temps mis lors de la transmission d'un message du nœud N_i vers le nœud N_j , nous pouvons situer dans l'ensemble des nœuds voisins. Une fois que la phase de reconnaissance terminée, l'ensemble des NC disposeront d'une base de connaissance parfaite sur le voisinage immédiat, à savoir : les distances entre les différents nœuds d_{ij} et la profondeur N_{hops} par rapport à la SB.

2. Phase de clusterisation

Comme dans le cas de l'approche HHRP, un NC ne peut devenir coordinateur que si le nombre aléatoire nb_a qu'il génère est inférieur ou égale à la probabilité P_{rob} fixée par la SB.

Une fois que la SB est informée de leur nouveau statut via un message $Message_Adv_{CH}(ID_{CH_i}, ID_{SB}, header)$ directement sur un seul saut si la SB est directement atteignable ou sur plusieurs sauts, et dans ce cas la sélection portera sur des nœuds ayant une profondeur $N_{hops(i)}$ minimal, l'ensemble des nœuds coordinateurs broadcastent à nouveau leur statut par l'envoi d'un message d'avertissement $Message_Adv_{CH}(ID_{CH_i}, header)$ contenant son identifiant ID_{CH_i} et un entête $header$ pour spécifier que c'est un message d'annonce.

Une fois $Message_Adv_{CH}$ réceptionné, chaque nœud capteur non-CH détermine son appartenance à un cluster en sélectionnant le CH nécessitant le minimum d'énergie de transmission. La décision d'appartenance se base sur la distance minimale séparant les différents nœuds coordinateurs et l'ensemble des NC (Figure-5.2).

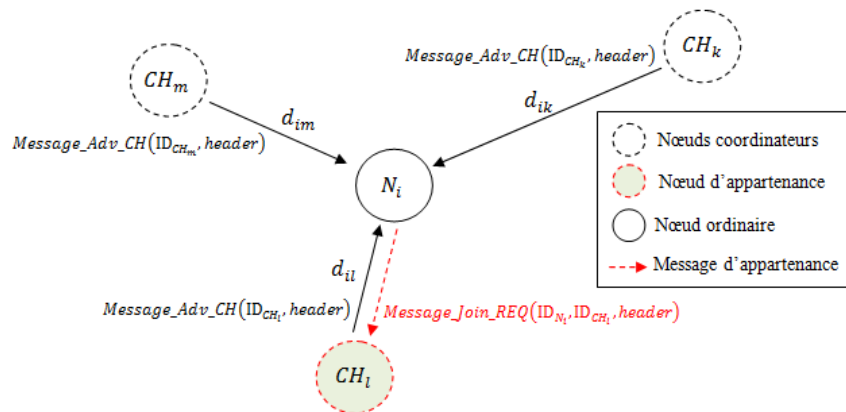


Figure 5.2 Appartenance à un cluster

A la réception, chaque NC effectue un choix d'appartenance à un nœud coordinateur pour devenir un NM par l'envoi d'un paquet d'affiliation de type $Message_{Join_{REQ(ID_{N_i}, ID_{CH_j}, header)}}$ en utilisant la méthode d'accès à la couche MAC : CSMA.

Le pseudo-code correspondant à ce processus est illustré dans la figure 5.3.

```

FOR EACH ( $NM_i$ ) ( $i = 1:n$ )
    IF ( $NM_i$ ) receives several  $Message\_Adv\_CH$ 
        Vérification de la table de routage et comparaison des distances temporelles :
         $diff_{CH_j}^{(i)}$  ( $j = 1:k$ )
        IF ( $diff_{CH_h}^{(i)} = diff_{CH_l}^{(i)}$ )
            Select lower value of ( $N_{hops}$ )
            Send  $Message\_Join_{REQ(ID_{MN_i}, ID_{CH_j}, header)}$ 
        ELSE Compare number of hops ( $N_{hops_{CH_j}}^{(i)}$ )
            IF ( $N_{hops_{CH_h}}^{(i)} = N_{hops_{CH_l}}^{(i)}$ )
                Random selection of ( $CH_j$ )
            END
        END
    END
END
    
```

Figure 5.3 Pseudo-code d'appartenance à un cluster. . Approche HRP_DCM

Une fois les messages $Message_Adv_{CH(ID_{CH_l}, header)}$ issus des différents coordinateurs sont réceptionnés au niveau d'un NC, ce dernier vérifiera sa table de routage et prend une décision d'appartenance à un cluster ayant une distance temporelle minimale. Si par exemple, il existe des valeurs redondantes, le choix se portera sur le nombre de sauts (N_{hops}). Le CH disposant d'un minimum de sauts nécessaires pour atteindre la SB sera sélectionné. Comme dans le cas de l'approche HHRP, si le nombre de sauts est identique, alors il procédera à une sélection aléatoire du cluster d'appartenance.

3. Attribution des slots

Afin d'assurer la communication intra-cluster de manière ordonnée et afin d'éviter les interférences et les collisions entre les nœuds, chaque nœud coordinateur attribue à ses différents NMs des slots temporaires bien déterminés. Cette étape est similaire à celle décrite dans le paragraphe 3.2.2 du précédent chapitre.

4. Phase de communication

La transmission d'informations d'un NC source vers la SB passe dans un premier par son nœud coordinateur, après traitement et agrégation des données, le CH_{FILS} correspondant devra faire un choix sur le meilleur chemin par optimisation de contraintes telles que les distances parcourues source-cible, les délais bout-en-bout, la puissance du signal, la consommation d'énergie et/ou le nombre de sauts.

Comme dans le cas de l'approche HHRP, le pseudo-code (Figure-5.4) associé à la sélection du chemin optimal utilise le même modèle de consommation présenté dans la sous-section 4.2.2, i.e., équations (4.17) à (4.35), et est décrit comme suit :

```

FOR EACH cluster  $j$  appartenant au voisinage du nœud source  $CH_{FILS}$  tel que  $j \in [1:k']$ 
    Calculer l'énergie résiduelle maximale  $E_{r-PARENT}^{(h)}$  tel que  $h \in [1:k']$ 
    Déterminer le seuil énergétique  $E_{r-seuil}$ 
    Tester l'énergie par rapport au seuil
    IF  $(E_{r-PARENT}^{(h)} - E_{r-PARENT}^{(j)}) \geq E_{r-seuil}$ 
        | Sélection du nœud  $h$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
    ELSE
        Déterminer le nombre de sauts  $(n_{hops}^{(j)})$  de chaque nœud cible  $CH_{PARENT}$ 
        Tester la différence entre  $(n_{hops}^{(j)})$  et de  $(n_{hops\_opt})$ 
        IF une seule solution de  $dn_{hops}^{(p)}$  existe
            | Sélection du nœud  $p$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
        ELSE
            Plusieurs solutions redondantes existent
            Comparer les distances temporelles des nœuds  $CH_{PARENT}$  cibles  $diff_{CH_j}$  ( $j = 1:k$ )
            Calculer la valeur minimale :  $diff_{CH_l} = \min(diff_{CH_1}, diff_{CH_2}, \dots, diff_{CH_j}, \dots)$ 
            IF  $diff_{PARENT}^{(l)}$  existe
                | Sélection du nœud  $l$  comme nœud  $CH_{PARENT}$  cible
            ELSE
                Plusieurs solutions redondantes existent
                Choix aléatoire du nœud  $CH_{PARENT}$  cible
            END
        END
    END
END
    
```

Figure 5.4 Pseudo-code de sélection de chemin optimal. Approche HRP_DCM

Ce pendant, si on dispose de plusieurs valeurs redondantes ($dn_{hops}^{(p)}$), le nœud source CH_{FILS} portera son critère de sélection sur la distance temporelle minimale $diff_{FILS-PARENT}^{(j)}$, tel que :

$$diff_{FILS,PARENT}^{(l)} = \min(diff_{FILS,PARENT}^{(1)}, diff_{FILS,PARENT}^{(2)}, \dots, diff_{FILS,PARENT}^{(k')}) \quad (5.5)$$

Avec :

$$diff_{FILS,PARENT}^{(k')} = T_{H_s}^{(FILS)} - T_{L_s}^{(PARENT)} \quad (5.6)$$

Plus la valeur de la distance temporelle fourni par chacun des nœuds CH_{PARENT} cibles est petite, plus il est proche de la source CH_{FILS} . Ainsi, l'énergie dissipée sera moindre étant donné que la transmission utilise en moyenne plus de 70% de l'énergie d'un nœud capteur. L'avantage de ce pseudo-code, comparativement à celui décrit dans l'approche HHRP dans la figure 4.15, est qu'il réalise moins de calculs pour choisir le CH_{PARENT} cible et que la décision peut-être prise rapidement étant donné que chaque CH_{FILS} dispose déjà d'une base de données établie initialement lors de la phase de reconnaissance sur l'ensemble de son voisinage.

L'organigramme global de l'approche HRP-DCM illustré dans la figure 5.5, décrit les différentes étapes de l'approche de routage HRP-DCM.

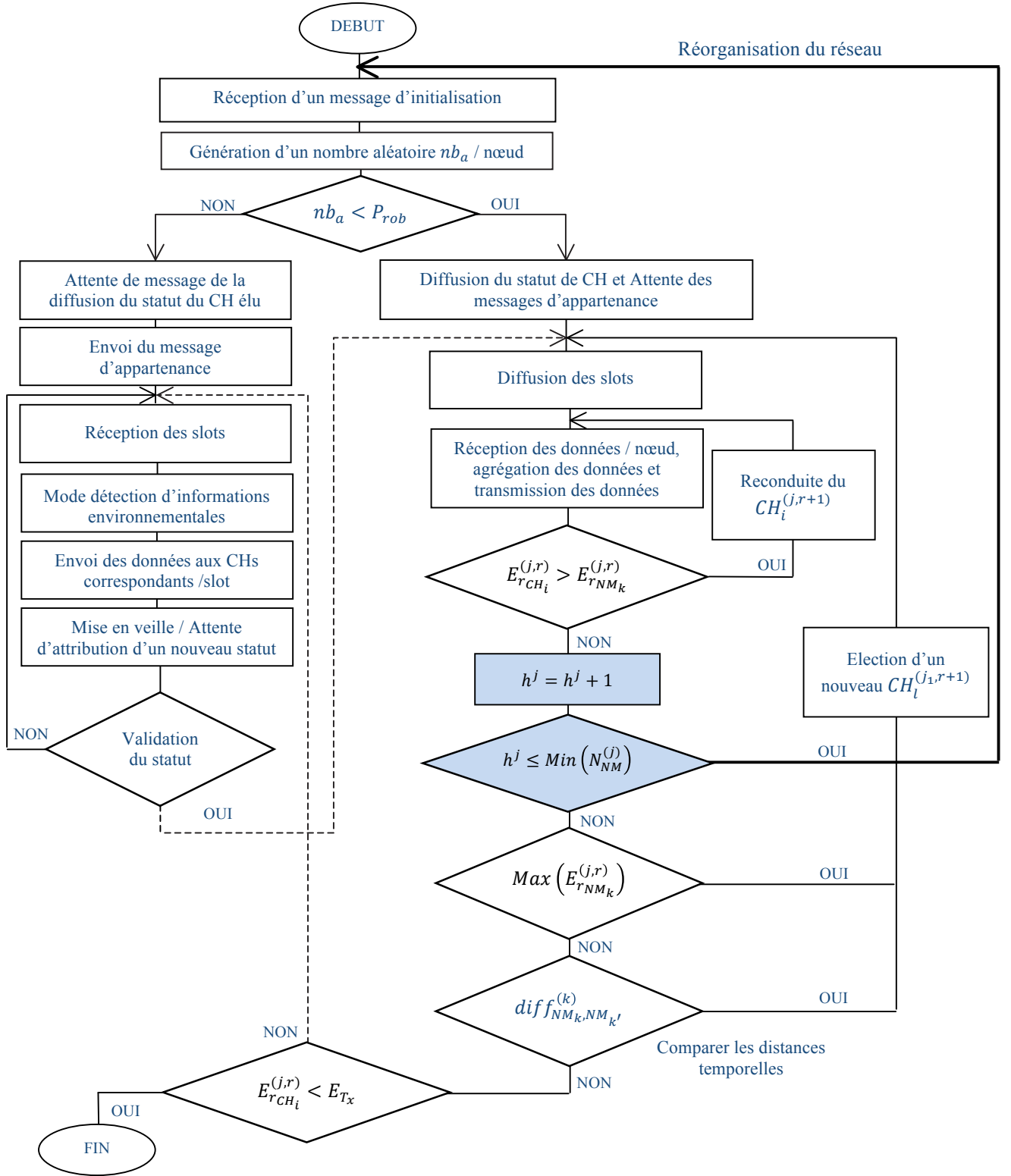


Figure 5.5 Comportement d'un nœud capteur dans un RCSF selon le protocole HRP-DCM

Chaque nœud capteur i appartenant à un cluster j doit disposer d'une énergie suffisante pour transmettre ou traiter les informations dans le réseau. A chaque round r , il doit disposer au minimum d'une énergie résiduelle $E_{r_{noeud_i}}^{(j,r)}$ proche d'un seuil énergétique E_{Tx} , tel que :

$$E_{r_{noeud_i}}^{(j,r)} < E_{Tx} \quad (5.7)$$

Ainsi, comme dans HHRP :

$$\text{un nœud } i \text{ est : } \begin{cases} \text{exclus du réseau SI } (E_{r_{\text{nœud}_i}^{(j,r)}} - E_{T_x}) < 0 \\ \text{reconduit dans le réseau SI non} \end{cases} \quad (5.8)$$

Similairement à l'approche HHRP, HRP-DCM détermine le cluster disposant du minimum de nombre de NMs de la manière suivante :

$$h^j = \text{Min}(N_{NM}^{(j)}) \quad (5.9)$$

Avec $N_{NM}^{(j)}$ le nombre de nœuds membres appartenant au cluster j .

Cela permet d'estimer approximativement le nombre de rounds minimal nécessaire pour assurer le fonctionnement du réseau avant la phase de réorganisation. Le dernier CH assurant la coordination, alerte la SB que le cluster ne peut sélectionner un nouveau nœud coordinateur. La SB commence alors à réorganiser l'architecture du réseau en régénérant une nouvelle probabilité P_{rob} et le mécanisme se relancera de lui-même en clusterisant à nouveau l'architecture. Le pseudo-code simplifié associé au processus correspondant est décrit dans la figure 5.6.

WHILE ($n_{ini} \gg 0$)

Organisation ou Réorganisation du réseau

Calcul du nombre de cluster $n_{CH} \leftarrow (10\%)n_{init}$

Génération de la probabilité P_{rob}

Broadcaste du message d'initialisation $Message_{init_{SB}}(ID_{N_i}, ID_{N_j}, P_{rob}, N_{hops}, \Delta T_{H_s}^{(N_i)})$

IF un NC(i) reçoit un $Message_{init_{SB}}$

Incréméntation du nombre de sauts : $N_{hops} \leftarrow N_{hops} + 1$

Calcul de la variation temporelle $(T_{L_s}^{(N_j)} - T_0)$

Calcul de la distance temporelle $(\Delta T_{L_s}^{(N_j)} - \Delta T_{H_s}^{(N_i)})$

Construction des tables de routage temporaires

Génération d'un nombre aléatoire nb_a

Test sur la probabilité d'élection

IF ($nb_a \leq P_{rob}$)

NC(i) se propose d'être un nœud CH

NC(i) alerte la SB via un message $Message_{Adv_CH}(ID_{CH_i}, ID_{SB}, header)$ de son nouveau statut en tant que nœud CH

NC(i) devient CH ($NC(i) \leftarrow CH_i$)

Le nouveau nœud CH_j alerte son voisinage en broadcastant le message type

$Message_{Adv_CH}(ID_{CH_j}, ID_{N_i}, header)$ pour construire son cluster

Pseudo-code d'appartenance aux clusters

NC(i) devient NM appartenant au cluster j ($NC(i) \leftarrow NM_i^{(j)}$)

ELSE

NC(i) garde son statut de nœud ordinaire

END

END

Pour chaque cluster j avec $j \in [1:k']$

Trouver le cluster minimal par calcul du nombre de rounds intermédiaires : $h^j = \text{Min}(N_{NM}^{(j)})$

WHILE ($h^j \leq \text{Min}(N_{NM}^{(j)})$)

Calcul des énergies résiduelles de chaque NM (k) / $h^{j,int}$: $E_{r_{NM_k}}^{(j,h^{j,int})}$

Vérification de la santé des nœuds par rapport au voisinage

IF ($E_{r_{NM_k}}^{(j,h^{j,int})} < E_{T_x}$)

Le nœud (NM_k) est mis en veille ou exclu du réseau



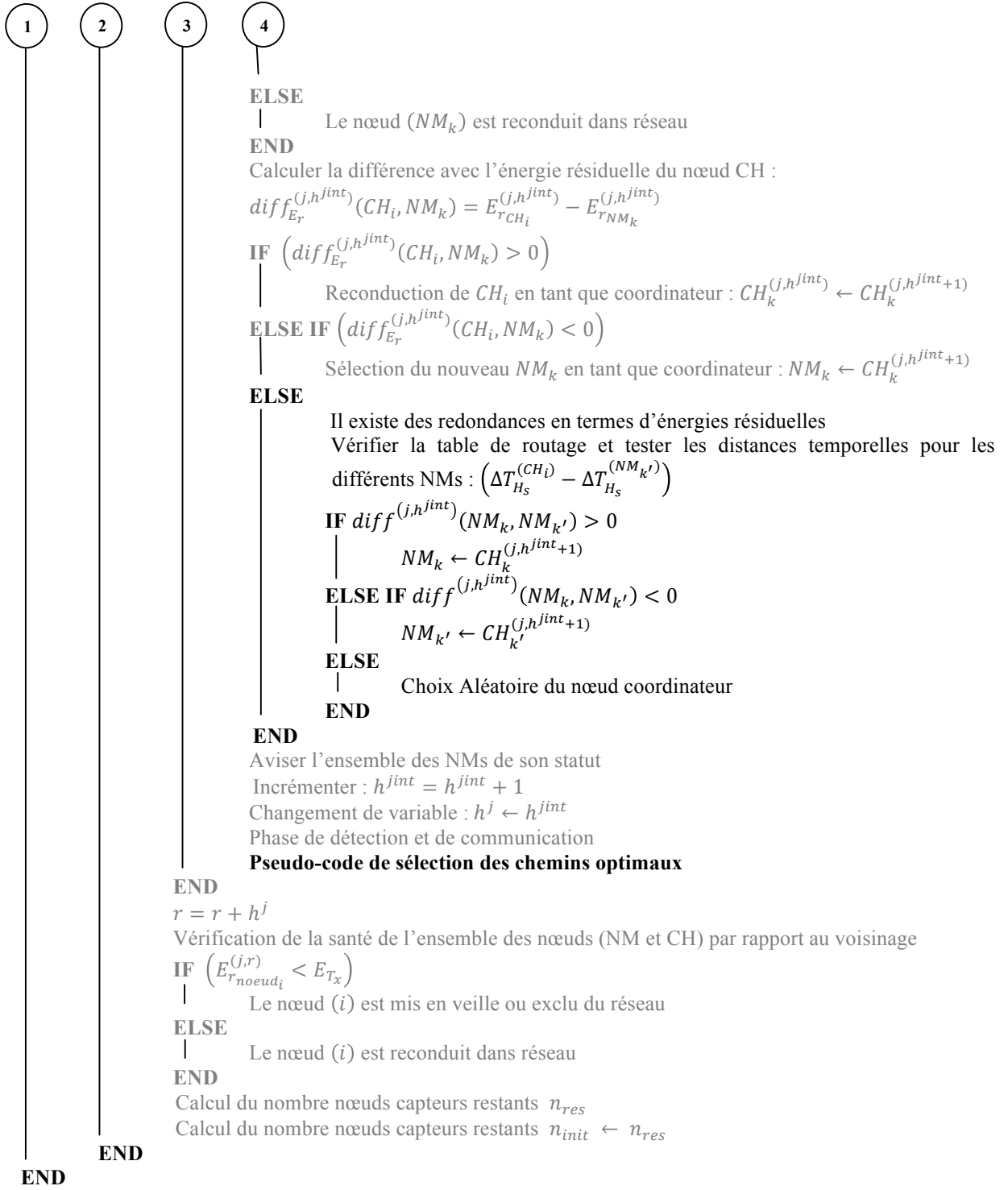


Figure 5.6 Pseudo-code du mécanisme de routage HRP-DCM

5.3 Mise en œuvre et analyse des résultats

Afin de montrer l'apport de l'approche HRP-DCM, nous réalisons une étude comparative par rapport à la première solution proposée HHRP, TEEN et LEACH. Nous utiliserons une plateforme de travail identique à celle présentée dans le chapitre 4 avec les mêmes paramètres d'expérimentation. De la même manière, nous considérons six RCSF avec des densités de 20, 50, 100, 150, 200 et 500 NC. L'évaluation des performances passe par la prise en compte de critères d'optimalité liés à la transmission et aux traitements des informations. On peut citer par exemple la consommation d'énergie et le trafic dans le réseau.

Les courbes de la consommation d'énergie de la figure 5.7 montrent bien l'apport des deux solutions proposées comparativement aux protocoles LEACH et TEEN. En effet, la solution protocolaire HRP-DCM assure une meilleure optimisation énergétique que les approches HHRP, TEEN et LEACH. Cela prouve que les améliorations apportées au niveau de la phase d'initialisation du réseau et particulièrement lors de la reconnaissance du voisinage dans HRP-DCM permettent d'optimiser les traitements et les transmissions radio pour la constitution des clusters limitant ainsi le nombre de messages à échanger entre les différents NC.

Si l'on considère que les performances d'un RCSF ne peuvent être assurées après la perte de 50% de l'énergie totale, alors à titre d'exemple pour un réseau à 150 NC, avec une énergie moyenne de 20 Joules, les solutions HRP-DCM et HHRP prolongent la durée de fonctionnement du réseau pour atteindre respectivement 53 et 42 rounds alors qu'elle n'est prolongée que de 21 et 34 rounds respectivement pour TEEN et LEACH. Cette différence augmente dans le temps pour atteindre les valeurs suivantes : 116, 100, 92 et 72 respectivement pour HRP-DCN, HHRP, TEEN et enfin LEACH.

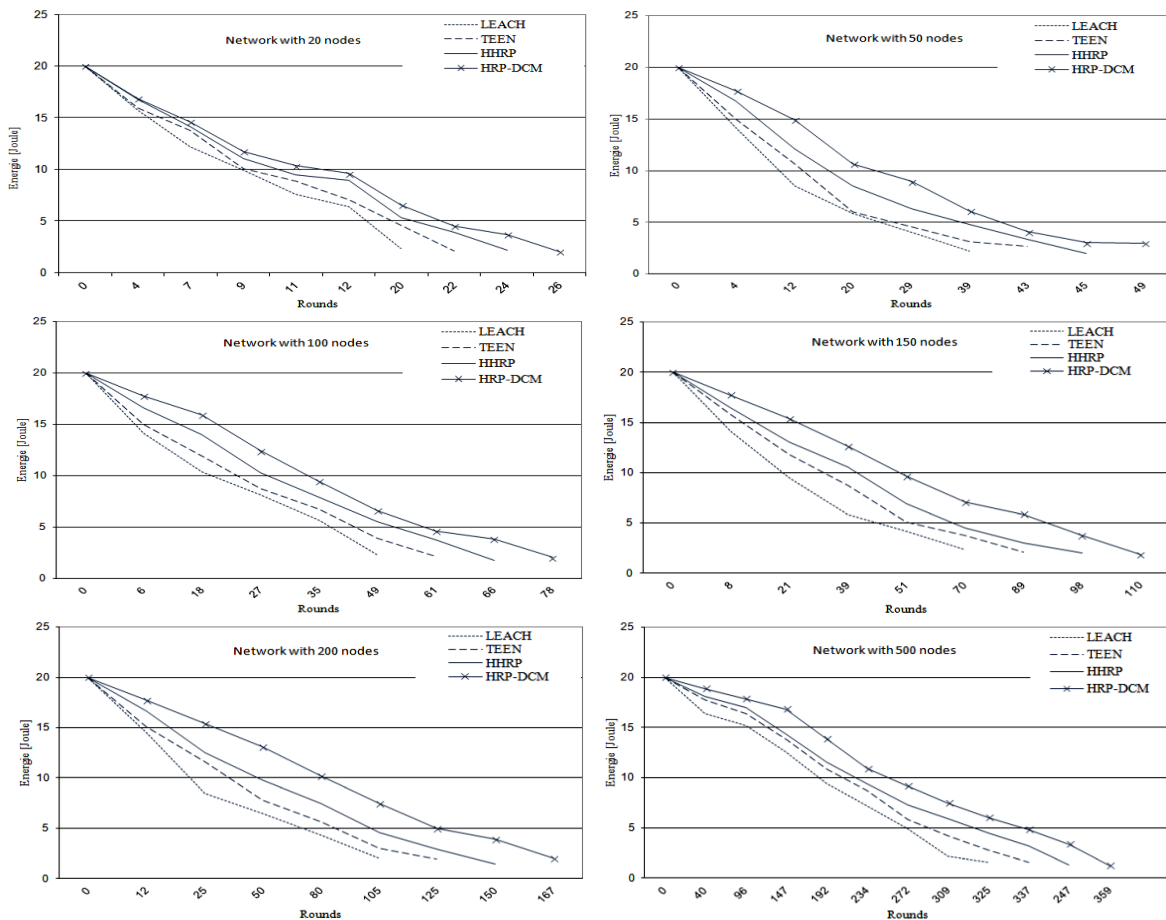


Figure 5.7 Consommation énergétique

Cela démontre que l'optimisation de la phase d'initialisation en termes de nombre de transmission, de traitement et de temps alloué permet à la solution protocolaire HRP-DCM d'améliorer ses performances en termes de consommation énergétique et d'exploitation des ressources.

Par ailleurs, l'intégration du modèle non linéaire permettant de déterminer les distances séparant les nœuds sources et les cibles en fonction du nombre de sauts, au modèle énergétique proposé apporte des améliorations significatives sur l'optimisation de la consommation d'énergie. Le meilleur compromis établi entre les distances et le nombre de sauts doit correspondre au chemin optimal que doit emprunter l'information.

Comme l'illustre la figure 5.8, acheminer les données agrégées au niveau d'un CH_{FILS} vers la SB se fait directement en un seul saut et dans ce cas, le CH_{PARENT} est représenté par la SB ou relayée sur plusieurs sauts pour lesquels chaque CH_{PARENT} recevant un message de la source CH_{FILS} redevient lui-même un CH_{FILS} en routant à son tour le message jusqu'à atteindre la destination.

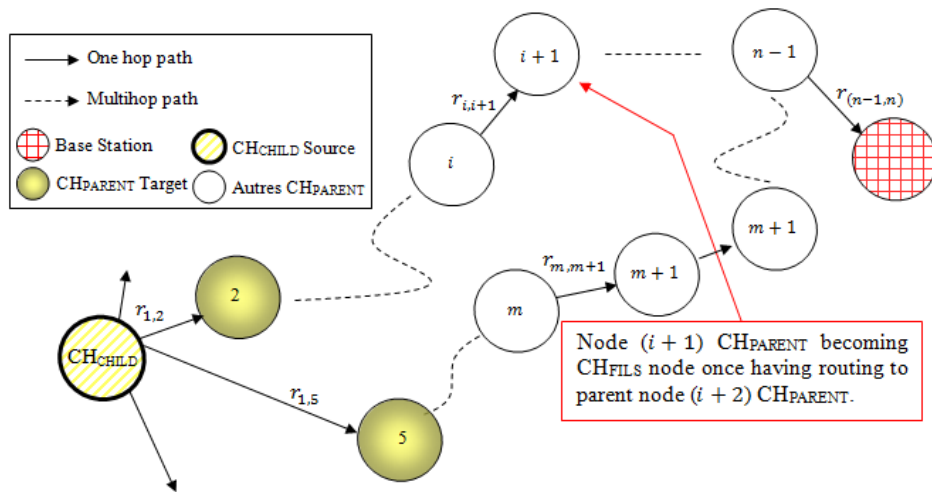


Figure 5.8 Optimisation de la communication multi-sauts CH_{FILS} – CH_{PARENT}

L'idée, étant d'améliorer la longévité du réseau en déterminant le meilleur chemin qui concilie le nombre de sauts et les meilleurs NC candidats dont les distances sont les plus proches. Cette longévité du réseau peut être illustrée par les différentes courbes de la figure 5.9. On remarque que pour un RCSF à 50 nœuds capteurs par exemple, le réseau commence à perdre ses premiers nœuds au bout du premier et second round respectivement lors de l'implémentation des protocoles LEACH et TEEN. Les deux solutions proposées HHRP et HRP-DCM quand à elles, les premiers nœuds disparaissent qu'au bout de 5 rounds. Par ailleurs, la densité s'atténue dans le temps jusqu'à la perte du réseau complètement mais d'une façon plus lente pour la solution HRP-DCM.

Ainsi, si l'on considère toujours que les performances d'un RCSF ne peuvent être assurées après la perte de 50% de l'ensemble des nœuds qui le composent alors on pourra conclure que HHRP et HRP-DCM améliorent les performances du réseau, en prolongeant la longévité du réseau pour atteindre respectivement 28 et 31 rounds, contrairement à LEACH et TEEN qui n'atteint que 23 et 26 rounds respectivement.

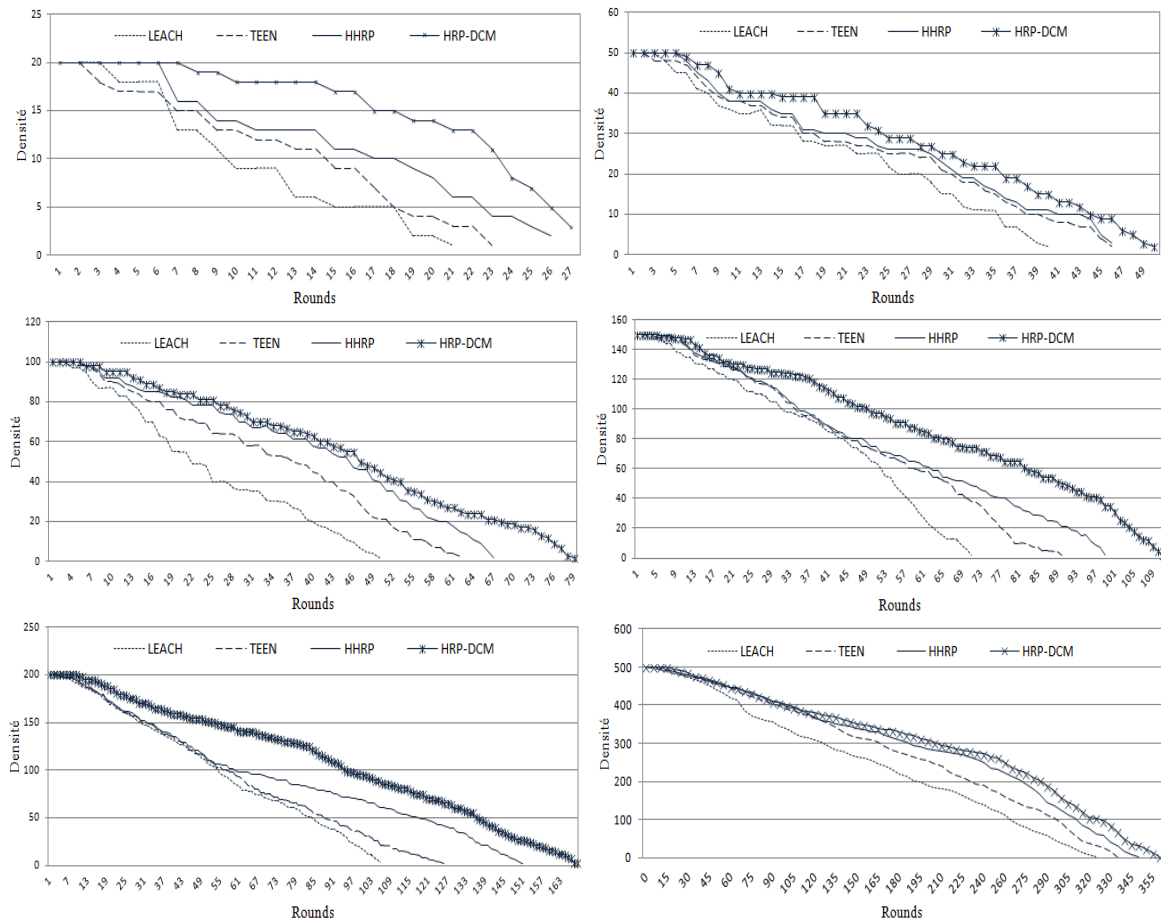


Figure 5.9 Longévité du réseau

D'autres résultats obtenus attestent de cela (Tab 5.1). En effet, l'énergie totale consommée lors de l'implémentation des différents protocoles sur des temps d'exécution précis allant de 300 à 3600 secondes montrent bien que la solution HRP-DCM optimise le fonctionnement du réseau d'un facteur gain moyen équivalent à 10%.

Temps d'exécution [s]	Energie totale consommée [Joule]			
	LEACH	TEEN	HHRP	HRP-DCM
300	1,0997	1,0006	0,9694	0,9017
600	2,3870	1,9403	1,2599	1,0579
1200	5,6396	4,0945	3,8692	3,0165
2400	7,4373	7,0467	6,0924	4,9201
3000	8,4678	8,0194	7,1961	6,282
3600	11,5937	10,1638	10,4981	8,8092

Tableau 5.1 Energie dissipée dans un réseau à 50 nœuds

D'autres résultats obtenus pour un RCSF à 500 NC montrent bien que la solution HRP-DCM optimise mieux la consommation énergétique (Tab 5.2).

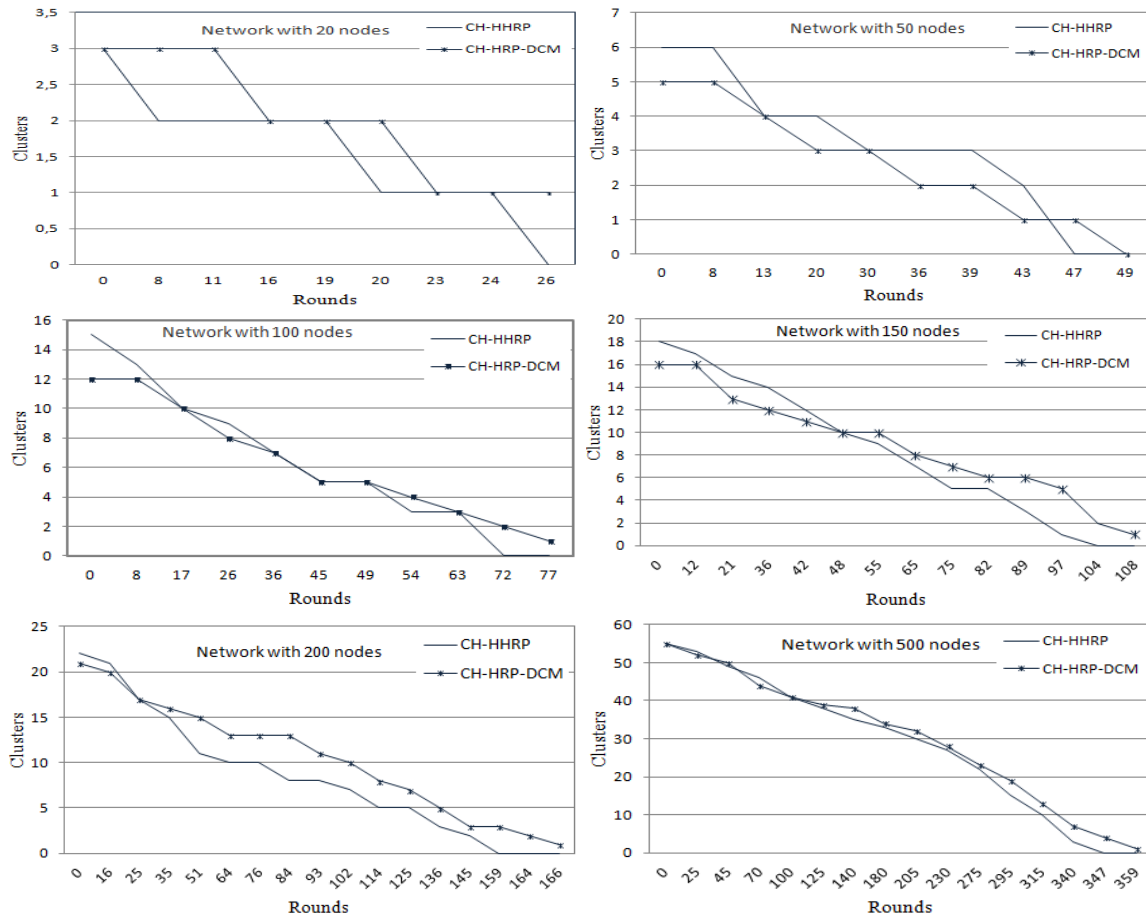
Temps d'exécution [s]	Energie totale consommée [Joule]			
	LEACH	TEEN	HHRP	HRP-DCM
300	1.1206	1.0743	1.0043	0.8945
600	2.8285	2.5836	2.1964	1.9264
1200	3.1543	3.0819	2.8937	2.5930
2400	6.1490	5.8276	4.2834	3.9201
3000	9.0874	7.7253	5.5398	4.7234
3600	10.8054	9.0372	7.4310	5.8119
7200	12.5142	11.1037	9.0920	7.1422
9000	13.9854	12.4935	10.7492	9.0153
15000	15.1659	13.7381	11.3198	10.3000
20000	16.6198	15.2463	12.2391	11.9183
30000	18.7514	16.2915	13.6346	12.2091

Tableau 5.2 Energie dissipée dans un réseau à 500 nœuds

L'analyse des résultats de la figure 5.9 et des tableaux 5.1 et 5.2 montre bien que l'approche HRP-DCM consomme moins d'énergie que les approches concurrentes et donc prolonge la durée de vie du RCSF. D'une manière générale, plus le réseau est dense plus le nombre de clusters est important. Par ailleurs, plus le nombre de cluster est grand plus on dispose d'une meilleure occupation du réseau. Comme l'illustrent les résultats de la figure 5.10, l'implémentation de la solution HRP-DCM génère dans la majorité des cas à quelques exceptions près plus de clusters que la solution HHRP, et donc assure une meilleure couverture. Cela permet aux NC lointains ou localisés sur les frontières des clusters de communiquer directement avec les CHs respectifs.

Pour une même densité, la solution HRP-DCM assure une meilleure couverture du réseau conduisant de fait l'ensemble des NC et CHs à transmettre leurs informations sur de courtes distances et donc diminuant l'énergie associée à la radio. A titre d'exemple pour un RCSF de densité 200 NC, le processus commence avec 23 et 21 clusters respectivement pour HRP-DCM et HHRP et maintient cette différence jusqu'à l'épuisement de tous les NC. Dans cet exemple, on constate que la solution HRP-DCM gagne plus de 10 rounds dans la longévité du réseau, et il atteint plus de 13 rounds pour le réseau à 500 nœuds.

La gestion du trafic dans le réseau est assurée essentiellement par deux mécanismes permettant l'accès à la couche MAC à savoir les méthodes CSMA/CA et TDMA afin d'éviter de probables collisions et interférences lors des échanges d'informations mais aussi les phénomènes de congestion dans les différents NC particulièrement au niveau des nœuds coordinateurs CHs où un CH_{PARENT} peut recevoir plusieurs informations de plusieurs CH_{FILS} . Par ailleurs, l'optimisation du nombre de messages échangés entre les différents CH_{FILS} et CH_{PARENT} permet d'éviter cela amoindrissant de fait l'énergie consommée. La figure 5.11 montre les messages utiles échangés dans les différents réseaux considérés, i.e., 50, 100, 150, 200 et 500 NC. Les messages liés aux phases de reconnaissance du voisinage et de constitution de clusters ne sont pas considérés.



On constate que plus la densité du réseau est grande plus le trafic est important, ce qui est tout à fait normal. Ainsi, chaque réseau dispose de plus de clusters et donc plus d'échanges en intra- et inter-CH. On remarque aussi que les deux solutions HRP-DCM et HHRP exploitent plus de messages. En effet, étant donné que la longévité des réseaux est plus importante que dans TEEN et LEACH, les deux solutions protocolaires proposées disposent de plus de temps de fonctionnement et donc de plus de messages échangés.

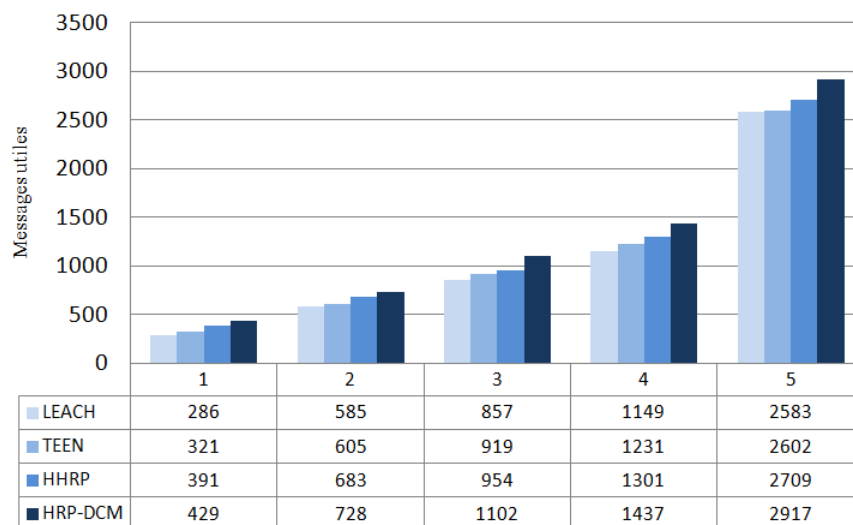


Figure 5.11 Trafic dans le réseau

Le déploiement du RCSF à 500 NC échange plus de 2917 messages utiles avec HRP-DCM avec un degré moindre qui est de 2709 pour HHRP et de 2602 et 2583 messages respectivement pour TEEN et LEACH.

Une fois le RCSF déployé, la phase d'initialisation nécessite des quantités importantes d'énergie pour enclencher le fonctionnement du réseau par des échanges d'informations entre l'ensemble des nœuds capteurs et la station de base. Dans un premier temps, une étape d'annonce d'un nouveau round r où la station de base diffuse dans l'ensemble du réseau une probabilité $P(t)$ conduisant chaque NC à prendre une décision sur son futur statut en générant à son tour une probabilité P_i pour devenir CH. Une fois élu, chaque CH informe son voisinage de son nouveau statut par diffusion d'un message d'avertissement ADV contenant son identificateur. Pour ce faire, le protocole MAC CSMA est utilisé afin d'éviter les collisions entre les différents CHs. La décision d'appartenir à un CH se base sur l'amplitude du signal reçu, le nœud CH ayant le signal le plus fort sera choisi.

Les clusters formés, chaque nœud CH assure la coordination des transmissions des données dans son propre groupe. Il utilise un modèle de communication qu'il transmet à l'ensemble de ses NMs via un protocole d'échange TDMA. Ainsi, chaque NM dispose d'un slot temporaire qui lui permet d'être actif pendant un intervalle de temps qui lui a été alloué par son CH et de communiquer avec lui, et le restant de temps il est dans un état inactif évitant ainsi de se trouver en sur-écoute ou en écoute passive minimisant de fait sa consommation d'énergie.

Dans la solution HRP-DCM, nous avons mis en œuvre le concept de calcul des distances temporelles afin d'optimiser le nombre de communications échangées en intra- et inter-clusters et d'éviter l'utilisation de la puissance du signal RSSI lors de la formation des clusters. En effet, l'utilisation de mesures RSSI à tous les niveaux du mécanisme peut engendrer des dégradations dans le réseau vu l'asymétrie des liaisons de communication et des délais d'attente de stabilisation des mêmes mesures importants pour l'exploitation. Les résultats de la figure 5.12 attestent des performances de la nouvelle solution HRP-DCM par rapport à HHRP et LEACH.

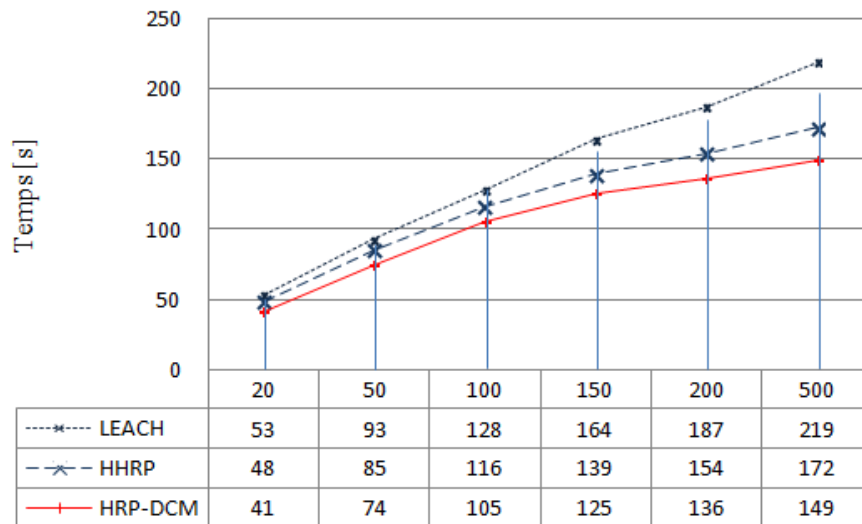


Figure 5.12 Délais de reconnaissance du voisinage et de clusterisation

On remarque bien que les délais associés à la reconnaissance du voisinage et de clusterisation augmentent en fonction de la densité du réseau. Plus le réseau est important plus l'initialisation prend plus de temps pour la hiérarchisation des nœuds et la constitution des clusters. Lors de l'implémentation de la solution HRP-DCM, un RCSF à 100 NC met exactement 105 secondes pour la formation des clusters alors que pour un réseau à 500 NC le délai est de 149 secondes, soit 44 secondes d'écart, ce qui est normal. Pour les mêmes réseaux, c'est-à-dire, 100 et 500 NC, les délais alloués par la solution HHRP sont respectivement de 116 et 172 secondes. On constate que quelque

soit la densité du réseau, la solution HRP-DCM est meilleure que HHRP et LEACH. Les gains moyens en termes de délais de reconnaissance du voisinage et de clusterisation pour un réseau à 50 NC est de 13% et 21% respectivement par rapport à HHRP et LEACH. Il est de 14% et 32% respectivement par rapport à HHRP et LEACH pour un réseau 10 fois plus grand. Des délais importants conduisent à une surconsommation d'énergie accélérant de fait la perte des nœuds et du réseau dans sa globalité.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une solution protocolaire HRP-DCM qui est une alternative à la première solution HHRP, afin d'apporter des améliorations d'un point de vue énergétique, d'exploitation des ressources et des délais des traitements et donc de la prolongation de la durée de vie du réseau.

La mise en œuvre de la solution proposée contourne l'utilisation de mesures RSSI à tous les niveaux du mécanisme, i.e., reconnaissance du voisinage, clusterisation et construction des chemins optimaux selon le concept FILS-PARENT. En effet, les données RSSI peuvent être la source de dégradations dans le réseau du à l'asymétrie des liaisons de communication impliquant aussi une lenteur d'exploitation des données étant donné que le signal RSSI tardent à se stabiliser.

La solution HRP-DCM se base sur l'utilisation du concept de calcul des distances temporelles lors du déploiement du réseau et de reconnaissance du voisinage. Ce concept permet de raccourcir les délais alloués à la phase d'initialisation atténuant ainsi la consommation énergétique.

L'évaluation des performances montre bien que HRP-DCM optimisent mieux le fonctionnement du réseau quelque soit sa densité comparativement à la solution HHRP et aux protocoles de routage TEEN et LEACH.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Dans cette thèse de recherche, nous avons abordé les diverses problématiques des applications type RCSF et particulièrement celles liées au routage d'informations. Nous avons exploré plusieurs solutions développées dans ce sens en attirant l'attention sur les facteurs améliorant et/ou dégradant les performances et le fonctionnement des réseaux. Cette étude nous a montré que malgré les avancées significatives de miniaturisation et d'intégration des composants électroniques, la mise en œuvre de ces solutions doit tenir compte des contraintes fonctionnelles et/ou structurelles telles que les caractéristiques intrinsèques des capteurs (consommation d'énergie, calcul et mémorisation) et environnementales (topologie du réseau, absence d'infrastructure, perte de nœuds).

Déployer un RCSF dans un milieu hostile le rend vulnérable à de multiples pannes allant de la défaillance physique causée par des facteurs environnementaux jusqu'à l'absence de ressources énergétiques dues à l'épuisement du dispositif batterie. Une intervention humaine est généralement difficile ou quasi-impossible à effectuer en raison de l'emplacement des capteurs. De ce fait, la gestion de la consommation énergétique devient une question incontournable dans la conception et la mise en œuvre d'un RCSF. Par ailleurs, garantir un fonctionnement efficace avec un accroissement de la longévité du réseau en se limitant uniquement à une solution matérielle reste insuffisant. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres solutions logicielles qui permettraient de maîtriser l'exploitation de l'information dès sa source jusqu'à son exploitation en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des capteurs, i.e., faibles capacités de stockage et de puissance de calcul, et des contraintes énergétiques associées. Répondre en partie à ces besoins, passe par le développement d'outils informatiques et de stratégies protocolaires en modes basse consommation mettant en œuvre des mécanismes basés sur des techniques de routage d'informations.

Pour ce faire, nous avons proposé une approche de routage hiérarchique hybride HHRP¹ qui se base sur un mécanisme de clusterisation et d'un modèle énergétique non linéaire considérant trois sources de consommation à savoir, la radio, les traitements et la formation des clusters. Le mécanisme utilise le concept de communication Fils-Parent avec une sélection des meilleurs chemins sur la base d'une minimisation d'une fonction de performance par rapport aux paramètres critiques : distances source-cible, consommation d'énergie et puissance du signal.

Cette approche repose sur trois phases principales : une phase de déploiement, d'initialisation et de reconnaissance du réseau dans laquelle des nœuds capteurs avec des caractéristiques bien définies et

¹ Hybrid Hierarchical Routing Protocol

spécifiques au type d'application sont déployés aléatoirement dans l'espace opérationnel, une phase de clusterisation dynamique qui tient compte des différents états des NC et une phase de communication dans laquelle un concept de communication mono ou multi-sauts FILS-PARENT est proposé pour optimiser les chemins et les délais d'acheminement des paquets source-destination. Contrairement au protocole standard LEACH, où les nœuds sélectionnent à plusieurs reprises leurs clusters d'appartenance, dans HHRP, le nœud sélectionne le CH ayant une énergie maximale par l'envoi d'un seul message pour devenir un NM. Cette procédure de sélection de nouveaux nœuds coordinateurs ne passe pas par la station de base, elle se fait directement au niveau de chaque cluster. Le CH prédécesseur sélectionne un nouveau CH à la fin de chaque round en fonction de son niveau énergétique dans un premier temps si non, en fonction de la puissance du signal reçu si le cas l'exige.

Les résultats obtenus à partir d'une plateforme TinyOS mettant en œuvre un RCSF composé de nœuds capteurs type MICA2, montrent bien que la solution protocolaire HHRP présente de meilleures performances comparativement aux protocoles LEACH et TEEN. Pour un RCSF à 50 nœuds capteurs, le réseau commence à perdre ses premiers nœuds au bout du premier et second round respectivement lors de l'implémentation des protocoles LEACH et TEEN. La solution proposée HHRP quand à elle, les premiers nœuds disparaissent qu'au bout de 5 rounds. Si l'on considère que les performances d'un RCSF ne peuvent être assurées après la perte de 50% de l'ensemble des nœuds qui le composent alors on pourra conclure que la longévité du réseau a augmenté pour atteindre 28 rounds pour HHRP, contrairement à LEACH et TEEN qui n'atteint que 23 et 26 rounds respectivement.

Par ailleurs, le nombre de messages échangés entre les différents NMs et les CHs est nettement inférieur dans HHRP que dans LEACH et TEEN impliquant ainsi une consommation énergétique moins importante. Il en est de même pour le nombre de nœuds inactifs qui est strictement inférieur dans HHRP. Ces résultats traduisent aussi une meilleure répartition de la charge et une meilleure optimisation des ressources dans le réseau maximisant ainsi sa longévité. On remarque aussi que plus le réseau est dense plus les performances sont importantes et visibles.

L'inconvénient que l'on a relevé est que lors de la phase de reconnaissance du voisinage, la solution HHRP nécessite l'utilisation de la puissance des signaux radio RSSI pour estimer les distances entre les différents nœuds capteurs. Or, dans les RCSF, les liaisons de communication sont asymétriques et étant donné que la puissance des signaux radio se mesure à la réception, cela peut engendrer des dégradations sur les performances du mécanisme de routage proposé et des erreurs d'estimation sur les valeurs RSSI. Ces dernières ne sont exploitables pour la localisation de nœuds qu'au bout d'un certain temps vu que la stabilité du signal n'est garantie que tardivement. Ainsi, le temps alloué pour la phase de reconnaissance devient important, accélérant de ce fait la consommation d'énergie et donc minimise la durée de vie du réseau. Pour y remédier, nous proposons une alternative en mettant en œuvre une seconde solution protocolaire qui se base sur un routage hybride avec un mécanisme de clusterisation dynamique HRP-DCM². La mise en œuvre de cette solution contourne l'utilisation de mesures RSSI à tous les niveaux du mécanisme, i.e., non seulement sur la phase de reconnaissance du voisinage et de clusterisation mais aussi lors de la phase de communication pour la construction des chemins optimaux selon le concept FILS-PARENT. La solution HRP-DCM se base sur l'utilisation du concept de calcul des distances temporelles. L'idée, étant d'améliorer la longévité du réseau en déterminant le meilleur chemin qui concilie le nombre de sauts et les meilleurs nœuds coordinateurs candidats dont les distances sont les plus proches.

L'évaluation des performances montre bien que HRP-DCM optimise mieux le fonctionnement du réseau quelque soit sa densité comparativement à la solution HHRP et aux protocoles de routage TEEN et

² Hybrid Routing Protocol based on Dynamic clustering Method

LEACH. Sur des intervalles d'exécution allant de 300 à 3600 secondes, HRP-DCM permet une optimisation de la consommation d'énergie d'un facteur gain moyen équivalent à 10%.

L'implémentation de la solution HRP-DCM génère dans la majorité des cas à quelques exceptions près plus de clusters que l'ensemble des autres solutions assurant de fait une meilleure couverture. Cela permet aux nœuds lointains ou localisés sur les frontières des clusters de communiquer directement ou sur un nombre de sauts minimal avec les CHs respectifs diminuant ainsi l'énergie associée à la radio. A titre d'exemple pour un RCSF de densité 200 NC, le processus commence avec 23 et 21 clusters respectivement pour HRP-DCM et HHRP et maintient cette différence jusqu'à l'épuisement de tous les NC avec un gain en longévité de 10 rounds pour la solution HRP-DCM. Le gain atteint plus de 13 rounds pour un réseau à 500 nœuds.

On a relevé et confirmé aussi que les délais associés à la reconnaissance du voisinage et de clusterisation augmentent en fonction de la densité du réseau. Plus le réseau est important, plus l'initialisation prend plus de temps pour la hiérarchisation des nœuds et la constitution des clusters. Lors de l'implémentation de la solution HRP-DCM, un RCSF à 100 nœuds capteurs met exactement 105 secondes pour la formation des clusters alors que pour un réseau à 500 NC le délai est de 149 secondes, soit 44 secondes d'écart, ce qui est normal. Pour les mêmes réseaux, c'est-à-dire, 100 et 500 NC, les délais alloués par la solution HHRP sont respectivement de 116 et 172 secondes. Quelque soit la densité du réseau, la solution HRP-DCM est meilleure que HHRP et LEACH. Les gains moyens en termes de délais de reconnaissance du voisinage et de clusterisation pour un réseau à 50 NC est de 13% et 21% respectivement par rapport à HHRP et LEACH. Il est de 14% et 32% respectivement par rapport à HHRP et LEACH pour un réseau 10 fois plus grand. Des délais importants conduisent à une surconsommation d'énergie accélérant de fait la perte des nœuds et du réseau dans sa globalité.

Partant des résultats obtenus dans ce travail de thèse, nous pouvons dégager plusieurs perspectives de recherche tant d'un point de vu théorique qu'applicatif. Ainsi, des investigations peuvent porter sur d'éventuelles extensions des solutions protocolaires proposées pour le routage d'informations avec prise en compte de l'environnement de déploiement et du déploiement proprement dit, du degré d'hétérogénéité des composants utilisés.

Nous pouvons relever dans un premier temps que même si les techniques basées sur la mobilité des nœuds capteurs telles que le transbordement de messages par des agents type MULE présentent des limitations au niveau des temps d'exécution et de traitement particulièrement lorsque les échanges par rendez-vous ne sont pas assurés, il serait intéressant de s'orienter vers le développement d'approches hybrides permettant d'assurer une coordination entre les différents paramètres tels que le positionnement et le suivi des déplacements des nœuds capteurs dans le temps, l'énergie consommée, la gestion des priorités inter- et intra-clusters.

L'utilisation d'algorithmes de prototypage rapide tels que ceux développés dans [157-158] permettrait d'accélérer le processus de clusterisation étant donné que la convergence est assurée au bout de trois itérations au maximum c'est à dire quelques millisecondes. Par ailleurs, nous pourrions disposer d'un processus complètement interprétable par des modèles et des règles linguistiques floues.

D'un point de vu applicatif, il serait très intéressant de s'orienter vers d'autres technologies nouvelles mettant en œuvre des réseaux WBAN par exemple pour des application embarquées liées au domaine de la santé telles que celles développées dans le cadre de notre travail de recherche pour l'assistance aux personnes à mobilité réduites [159-162] et l'interprétation de la pensée via des dispositifs capteurs sans fil [163].

Bibliographie

- [1] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal. Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, 52(12) 2008, pp.2292-2330.
- [2] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci. A survey on Sensor Networks, *IEEE Communications Magazine*, 40(8) 2002, pp.102-114.
- [3] C.Y. Chong and S. Kumar. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges, in *Proceedings of the IEEE*, 91(8) 2003, pp.1247-1256.
- [4] M. Tubaishat and S. Madria. Sensor networks: an overview, *IEEE Potentials*, 22(2) 2003, pp.20-23.
- [5] M.J. Piran, G.R. Murthy, G.P. Babu. Vehicular Adhoc and sensor networks: Principles and challenges, *International Journal of Adhoc, Sensor and Ubiquitous Computing*, 2(2) 2011, pp.38-49.
- [6] M. Ulema, J.M. Nogueira and B. Kozbe. Management of Wireless Ad-Hoc Networks and Wireless Sensor Networks, *Journal of Systems and Network Management, Springer*, 14(3) 2006, pp. 327-333.
- [7] P. Santi. Topology control in wireless Adhoc and sensor networks, *ACM Computing Survey*, 37(2) 2005, pp.164-194.
- [8] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Minand A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *Proceedings of ACM MobiCom*, Roma (Italy), 2001, pp.272–286.
- [9] G.J. Pottie and W.J. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *ACM Communications*, 43(5) 2000, pp.52-58.
- [10] J.M. Kahn, R.H. Katz and K.S.J. Pister. Next century challenges: mobile networking for smart dust, in *Proceedings of the ACM MobiCom '99*, Seattle (WA), 1999, pp.271-278.
- [11] C. Li, H. Zhang, B. Hao, J. Li. A Survey on Routing Protocols for Large-Scale Wireless Sensor Networks, *Sensors 2011*, (11) 2011, pp.3498-3526.
- [12] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, Routing techniques in wireless sensor networks: A survey, *IEEE Wireless Communications*, (11) 2004, pp.6-28.
- [13] J. Aslam, Q. Li and D. Rus, Three power-aware routing algorithms for sensor networks, *Journal of Wireless Communications Mobile Computing*, (3) 2002, pp.187-208.

- [14] R.C. Shah, J. Rabaey. Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Orlando (FL), 2002, pp.17-21.
- [15] C. Schurgers and M.B. Srivastava, Energy efficient routing in wireless sensor networks, *Proceedings of Military Communications Conference on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean (VA), (1) 2001, pp.357-361.
- [16] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, in *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, vol.8, 2000, pp.8020-8030.
- [17] B. Paolo, P. Prashant and W.C. Vince. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 ZigBee standards, *Computer Communications*, 30(7) 2007, pp.1655-1695.
- [18] S. Tilak, N. Abu-Ghazaleh and W. Heinzelman. A taxonomy of Wireless Micro-sensor Network Models, *ACM SIGMOBILE, Mobile Computing and Communications Review*, 6(2) 2002, pp.28-36.
- [19] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Adhoc Networks*, 7(3) 2009, pp.537-568.
- [20] J. Ansari, D. Pankin, and P. Mahonen. Radio-Triggered Wake-ups with Addressing Capabilities for Extremely Low Power Sensor Network Applications, in *Proceedings of the 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes (France), 2008, pp.1-5.
- [21] A. Keshavarzian, H. Lee and L. Venkatraman. Wakeup scheduling in wireless sensor networks, in *Proceedings of the ACM MobiHoc*, Florence (Italy), 2006, pp.322-333.
- [22] L. Gu and J. Stankovic. Radio-Triggered Wake-up for Wireless Sensor Networks, *Real-Time Systems Journal*, (29) 2005, pp.157-182.
- [23] D. Mirza, M. Owrang and C. Schurgers. Energy-efficient Wakeup Scheduling for Maximizing Lifetime of IEEE 802.15.4 Networks, in *Proceedings of the International Conference on Wireless Internet*, Budapest (Hungary), 2005, pp.130-137.
- [24] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao and D. Estrin. Networking Issues in Wireless Sensor Networks, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, (64) 2004, pp.799-814.
- [25] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring, *Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, September 2002, Atlanta (USA), pp.88-97.
- [26] A. Warriar, S. Park J. Mina and I. Rhee. How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks? a practical study, *ACM Computer Communications*, 30(14) 2007, pp.2867-2879.
- [27] Z. Kong and E.M. Yeh. Distributed Energy Management Algorithm for Large-Scale Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Adhoc Networking and Computing*, Montreal (CA), 2007, pp.209-218
- [28] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin. Geography-informed Energy Conservation for Adhoc Routing, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Roma (Italy), 2001, pp.70-84.
- [29] P. Casari, A. Marcucci, M. Nati, C. Petrioli and M. Zorzi. A detailed simulation study of geographic random forwarding (GeRaF) in wireless sensor networks, *Proceedings of IEEE Military Communications Conference*, (1) 2005, pp.59-68.

-
- [30] M. Zorzi and R.R. Rao. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Adhoc and Sensor Networks: Multihop Performance, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2(4) 2003, pp.337-348.
 - [31] M. Zorzi and R.R. Rao. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2(4) 2003, pp.349- 365.
 - [32] K. Langendoen and N. Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison, *Computer Networks*, 43(4) 2003, pp.499-518.
 - [33] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris. SPAN: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Adhoc Wireless Networks, *Wireless Networks Journal*, 8(5) 2002, pp.481-494.
 - [34] A. Cerpa and D. Estrin. ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3) 2004, pp.272-285.
 - [35] R. Zheng, J.C. Hou and L. Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks, *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2003, pp.35-45.
 - [36] I. Demirkol, C. Ersoy and F. Alagoz. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey, *IEEE Communications Magazine*, 44(4) 2006, pp.115-121.
 - [37] K. Kurtis and M. Prasant. Medium Access Control in Wireless Sensor Networks, *Computer Networks*, 51(4) 2007, pp. 961-994
 - [38] R. Yadav, S. Varma and N. Malaviya. Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks, *UbiCC Journal*, 4(3) 2009, pp.827-834.
 - [39] W. Ye and J. Heidemann. Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) 2004, pp.493-507.
 - [40] J. Li and G. Lazarou. A Bit-map-assisted energy-efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Berkeley (USA), April 2004, pp.55-60.
 - [41] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Micro-sensor Networks, in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol.8, January 2000, pp.8020-8030.
 - [42] K. Arisha, M.A. Youssef and M.F. Younis. Energy-aware TDMA-based MAC for Sensor Networks, in *System-Level Power Optimization for Wireless Multimedia Communication*, ISBN 978-0-306-47720-1, 2002, pp.21-40.
 - [43] J.C. Haartsen. The Bluetooth Radio System, *IEEE Personal Communications*, 7(1) 2000, pp.28-36.
 - [44] V. Rajendran, K. Obraczka and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, Application-aware Medium Access for Sensor Networks, in *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Washington DC (WA), 2005, pp.622-630.
 - [45] V. Rajendran, K. Obracza and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, Collision-free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Ssystems*, Los Angeles (CA), 2003, pp.181-192.
 - [46] J. Polastre, J. Hill and D. Culler. Versatile Low Power Media Access for Sensor Networks, in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor*

- Systems*, 2004, pp.95-107.
- [47] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler and K. Pister. System Architecture Directions for Networked Sensors, *ACM SIGPLAN*, 35(11) 2000, pp.93-104.
 - [48] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) 2004, pp.493-506.
 - [49] T.V. Dam and K. Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Los Angeles (CA), November 2003, pp.171-180.
 - [50] G. Lu, B. Krishnamachari and C.S. Raghavendra. An Adaptive Energy-efficient and Low-latency Mac for Data Gathering in Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the 18th International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, April 2004.
 - [51] A. Ephremides and O. Mowafi. Analysis of a Hybrid Access Scheme for Buffered User-Probabilistic Time Division, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 8(1) 1982, pp.52-61.
 - [52] M.C. Vuran, O. B. Akan and I.F. Akyildiz. Spatio-Temporal Correlation: Theory and Applications for Wireless Sensor Networks, *Computer Networks Journal*, 45(3) 2004, pp.245-261.
 - [53] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer and M. Zorzi. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey, *IEEE Wireless Communications*, 14(2) 2007, pp.70-87.
 - [54] S.S. Pradhan and K. Ramchandran. Distributed source coding using syndromes DISCUS: design and construction, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(3) 2003, pp.626-643.
 - [55] C. Tang and C.S. Raghavendra. Compression techniques for wireless sensor networks, *Wireless Sensor Networks*, Springer Publisher, Part 3, 2004, pp.207-231.
 - [56] M. Wu and C.W. Chen. Multiple bitstream image transmission over wireless sensor networks, in *Proceedings of the IEEE Sensors*, vol.2, 2003, pp.721-731.
 - [57] Z. Xiong, A.D. Liveris and S. Cheng. Distributed source coding for sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 21(5), 2004, pp.80-94.
 - [58] D. Chu, A. Deshpande, J.M. Hellerstein and W. Hong. Approximate Data Collection in Sensor Networks using Probabilistic Models, in *Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering*, Atlanta (GA), April 2006, pp.48-60.
 - [59] B. Kanagal and A. Deshpande. Online Filtering, Smoothing and Probabilistic Modeling of Streaming Data, in *Proceedings of the 24th International Conference on Data Engineering*, Cancun (MEXICO), April 7-12, 2008, pp.1160-1169.
 - [60] J. Li and P. Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks, *Pervasive Mobile Computing*, 3(3) 2007, pp.233-254.
 - [61] D. Tulone and S. Madden. PAQ: Time series forecasting for approximate query answering in sensor networks, in *Proceedings of the 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks*, February 2006, pp.21-37.
 - [62] D. Tulone and S. Madden. An energy-efficient querying framework in sensor networks for detecting node similarities, in *Proceedings of the 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, October 2006, pp.291-300.
 - [63] Y.A. Le Borgne, S. Santini and G. Bontempi. Adaptive Model Selection for Time Series Prediction in Wireless Sensor Networks, *Journal of Signal Processing*, 87(12) 2007, pp.3010-

- 3020.
- [64] P. B. Godfrey and D. Ratajczak. Naps: Scalable, Robust Topology Management in Wireless Ad Hoc Networks, in *Proceedings of the 3rd international Symposium on information Processing in Sensor Networks*, Berkeley (CA), 2004, pp.443-451.
 - [65] S. Goel, A. Passarella and T. Imielinski. Using buddies to live longer in a boring world, in *Proceedings of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, Pisa (Italy), 2006, pp.342-347.
 - [66] Q. Han, S. Mehrotra and N. Venkatasubramanian. Energy Efficient Data Collection in Distributed Sensor Environments, in *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, 2004, pp.590-597.
 - [67] A. Deshpande, C. Guestrin, S. Madden, J.M. Hellerstein and W. Hong. Model-Driven Data Acquisition in Sensor Networks, in *Proceedings of the 30th International Conference on Very Large Data Bases*, Toronto (Canada), vol.30, 2004, pp.588-599.
 - [68] V. Erramilli and M. Crovella. Mobile-relay Forwarding in Opportunistic Networks with Resource Constraints, in *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Challenged Networks*, 2008, pp.41-48.
 - [69] H. Jun, M.H. Ammar and E.W. Zegura. Power Management in Delay Tolerant Networks: A Framework and Knowledge-Based Mechanisms, in *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2005, pp.418-429.
 - [70] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis and C. Petrioli. Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime, in *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, January 2005.
 - [71] S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash and S. Venkatesan. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations, in *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM*, vol.1, 2003, San Francisco (CA), pp.377-381.
 - [72] I. Papadimitriou and L. Georgiadis. Energy-aware Routing to Maximize Lifetime in Wireless Sensor Networks with Mobile Sink, *Journal of Communications Software and Systems*, 2(2) 2006, pp.141-151.
 - [73] S. Basagni, A. Carosi, E. Melachrinoudis, C. Petrioli and Z.M. Wang. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime, *Journal of Wireless Networks*, 14(6) 2007, pp.831-858.
 - [74] H. Jun, W. Zhao, M. Ammar, E. Zegura, and C. Lee. Trading Latency for Energy in Wireless Ad Hoc Networks using Message Ferrying, in *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, March 2005, pp.220-225.
 - [75] W. Zhao, M. Ammar and E. Zegura. A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks, in *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, Tokyo (Japan), May 2004, pp.187-198.
 - [76] S. Jain, R.C. Shah, W. Brunette, G. Borriello and S. Roy. Exploiting Mobility for Energy Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks, *Journal of Mobile Networks and Applications*, 11(3) 2006, pp.327-339.
 - [77] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain and W. Brunette. Data MULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks”, in *Proceedings of the 1st International Workshop on Sensor*

- Network Protocols and Applications*, 2003, pp.30-41.
- [78] A. Kansal, A.A. Somasundara, D.D. Jea, M.B. Srivastava and D. Estrin. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks, in *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, Boston (MA), June 2004, pp.111-124.
 - [79] A.A. Somasundara, A. Kansal, D.D. Jea, D. Estrin and M.B. Srivastava. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(8) 2006, pp.958-973.
 - [80] D. Jea, A.A. Somasundara and M.B. Srivastava. Multiple Controlled Mobile Elements (Data Mules) for Data Collection in Sensor Networks, in *Proceedings of the 1st IEEE/ACM International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Marina del Rey (CA), June 2005, pp.244-255.
 - [81] I.F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges, *Journal of Ad Hoc Networks*, 3(3) 2005, pp.257-279.
 - [82] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin and P. Corke. Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network, Proc. of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, San Diego (CA), November 2005, pp.154-165.
 - [83] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. Peh and D. Rubenstein. Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with Zebranet, in *Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems*, 2002, pp.94-107.
 - [84] T. Small and Z. Haas. The Shared Wireless Infostation Model: A New Ad Hoc Networking Paradigm (or Where There Is a Whale, There Is a Way), in *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2003, pp.233-244.
 - [85] Z.J. Haas and T. Small. A New Networking Model for Biological Applications of Ad Hoc Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 14(1) 2006, pp.27-40.
 - [86] Y. Yao and J. Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks, in *ACM SIGMOD Record*, 31(3) 2002, pp.9-18.
 - [87] N. Sadagopan, B. Krishnamachari and A. Helmy. The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, in *the Proceedings of the 1st International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, Anchorage, Alaska, 2003, pp.149-155.
 - [88] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks, in *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston (MA), August 2000, pp.56-67.
 - [89] F. Ye, A. Chen, S. Liu and L. Zhang. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks, in *IEEE Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2001, pp.304-309.
 - [90] W. Heinzelman, J. Kulik and H. Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks, in *Proceedings of the 5th ACM/IEEE Mobicom Conference*, Seattle (WA), pp.174-85, 1999.
 - [91] J. Kulik, W. R. Heinzelman and H. Balakrishnan. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks, in *Wireless Networks*, vol.8, 2002, pp.169-185.

- [92] S. Hedetniemi and A. Liestman. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks, *IEEE Networks*, 18(4) 1988, pp.319-349.
- [93] D.B. Johnson and D.A. Maltz. Dynamic Source Routing in Adhoc Wireless Networks, in *Mobile Computing*, Tomasz Imielinski and Hank Korth , editors, 1996, pp.153-181.
- [94] D.B. Johnson, D.A. Maltz and J. Broch. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks, in *Adhoc Networking*, Charles E. Perkins, editors, pp. 139-172, Addison-Wesley, 2001.
- [95] C.E Perkins and E.M. Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing, in *Proceedings of Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans (LA), 1999, pp.90-100.
- [96] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann and F. Silva. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(1) 2003, pp. 2-16.
- [97] D. Braginsky and D. Estrin. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks, in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta (GA), 2002, pp.22-31.
- [98] M. Chu, H. Haussecker and F. Zhao. Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks, in *the International Journal of High Performance Computing Applications*, 16(3) 2002, pp.293-313.
- [99] L. Pahlavan and A. Levesque. Wireless information network. Wiley-InterScience, ISBN.0-471-10607-0, New York, NY, USA, 1995.
- [100] W. Ye, J. Heidermann, and D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, vol.3, June 2000, pp.1567-1576.
- [101] H. Yang and B. Sikdar. Optimal cluster head selection in the LEACH architecture, *International Performance, Computing, and Communications Conference*, New Orleans (LO), 2007, pp.93-100.
- [102] M.B. Yassein, A. Al-zoubi, Y. Khamayseh and W. Mardini. Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network, in *Journal of Digital Content technology and its Applications*, 3(1) 2009, pp.132-136.
- [103] Y. Liang and H. Yu. Energy adaptive Cluster-Head selection for wireless sensor networks, in *Proceedings of the 6th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, PDCAT*, 2005, pp.634-638.
- [104] V. Loscri, G. Morabito and S. Marano. A two-level hierarchy for low-energy adaptive clustering hierarchy (TL-LEACH). *Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference*, vol.3, Sept. 2005, pp.1809-813.
- [105] V. Mhatre and C. Rosenberg. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation. *Adhoc Networks Journal*, vol.2, no.1, pp.45-63, 2004.
- [106] S. Lindsey and C. Raghavendra. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems, in *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 3(9-16) 2002, pp.1125-1130.
- [107] A. Savvides, C-C Han and M. Srivastava. Dynamic fine-grained localization in adhoc networks of sensors, in *Proceedings of the 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, July 2001, pp.66-179.
- [108] A. Manjeshwar and D.P. Agarwal. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks, in *Proceedings of the 15th International Symposium on Parallel and*

- Distributed Computing*, San Francisco (CA), 2001, pp.2009-2015.
- [109] A. Manjeshwar and D.P. Agarwal. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks, in *Proceedings of International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2002, pp.195-202.
 - [110] L. Subramanian and R.H. Katz. An architecture for building self configurable systems, in the *Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Boston (MA), in 1st Annual Workshop on Mobile and AdHoc Networking and Computing, 2000, pp.63-73.
 - [111] F. Sen, Q. Bing and T. Liangrui. An improved Energy-Efficient PEGASIS-Based protocol in Wireless Sensor Networks, in *8th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, vol.4, 2011, pp.2230-2233.
 - [112] S.M. Jung, Y.J. Han and T.M. Chung. The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in PEGASIS, in *9th International Conference on Advanced Communication Technology*, vol.1, 2007, pp.260-265.
 - [113] P. Balamurugan and K. Duraiswamy. Consistent and proficient algorithm for data gathering in wireless sensor networks, in *Journal of Computer Science*, 7(9) 2011, pp.1400-1406.
 - [114] O. Younis and S. Fahmy. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(4) 2004, pp.366-369.
 - [115] M. Mehrani, J. Shanbehzadeh, A. Sarrafzadeh, S.J. Mirabedini and C. Manford. FEED: Fault tolerant, energy-efficient, distributed clustering for WSN, *Global Journal of Computer Science and Technology*, 11(2) 2011.
 - [116] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, Technical report 00-729, Computer science department, University of Southern California, April 2000.
 - [117] S. Capkun, M. Hamdi and J. Hubaux. GPS-free positioning in mobile ad-hoc networks, in *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2001 pp. 3481-3490.
 - [118] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin. Geography-informed Energy Conservation for Adhoc Routing, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Roma (Italy), 2001, pp.70-84.
 - [119] Y. Yu, D. Estrin and R. Govindan. Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks, *UCLA Computer Science Department Technical Report*, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
 - [120] B. Karp and H.T. Kung. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks, in the *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, August 2000.
 - [121] S. Roychowdhury and C. Patra. Geographic adaptive fidelity and geographic energy aware routing in adhoc routing, in *International Journal of Computer and Communication Technology*, 2(2-4) 2010, pp.309-313.
 - [122] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks, in *Journal of Wireless networks*, 8(5), 2002, pp.481-494
 - [123] B. Nath and D. Niculescu. Routing on a curve, *ACM SIGCOMM Computer Communication*

- Review*, 33(1), 2003, pp.155-160.
- [124] V. Rodoplu and T.H. Meng. Minimum energy mobile wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8) 1999, pp.1333-1344.
 - [125] L. Li and J.Y. Halpern. Minimum-energy mobile wireless networks revisited, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Helsinki (Finland), vol.1, July 2001, pp.278-283.
 - [126] I. Stojmenovic and X. Lin. GEDIR: Loop-free location based routing in wireless networks, in *International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems*, Boston (MA), 1999, pp.1025-1028.
 - [127] F. Kuhn, R. Wattenhofer and A. Zollinger. Worst-case optimal and average-case efficient geometric adhoc routing, in *Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2003, pp.267-278.
 - [128] J. H. Chang and L. Tassiulas. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks, in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(4) 2004, pp.609-619.
 - [129] C. Rahul and J. Rabaey. Energy aware routing for low energy adhoc sensor networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol.1, March 2002, Orlando (FL), pp.350-355.
 - [130] Q. Li, J. Aslam and D. Rus. Hierarchical power-aware routing in sensor networks, in *Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking*, May 2001.
 - [131] S. Dulman, T. Nieberg, J. Wu and P. Havinga. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks, *IEEE Wireless Communications and Networking*, New Orleans (LO), USA, vol.3, March 2003, pp.1918-1922.
 - [132] T. He, J.A. Stankovic, L. Chenyang and A. Abdelzaher. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks, in *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems*, Providence (RI), May 2003, pp.46-55.
 - [133] M.N. Halgamuge, M. Zukerman and K. Ramamohanarao. An estimation of sensor energy consumption, *Progress in Electromagnetics Research B*, vol.12, 2009, pp.259-295.
 - [134] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4) 2002, pp.660-670.
 - [135] M.J. Miller and N.H. Vaidya. A MAC protocol to reduce sensor network energy consumption using a wakeup radio, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(3) 2005, pp.228-242.
 - [136] J. Zhu and S. Papavassiliou. On the energy-efficient organization and the lifetime of multi-hop sensor networks, *IEEE Communication Letter*, 7(11) 2003, pp.537-539.
 - [137] H. Chen and S. Megerian. Cluster sizing and head selection for efficient data aggregation and routing in sensor networks, *IEEE Conference on Wireless Communications and Networking*, Las Vegas (NV), 2006, pp.2318-2323.
 - [138] A. Khan, A. Abdullah and N. Hasan. Maximizing lifetime of homogeneous WSN through energy efficient clustering method. *International Journal of Computer Science and Security*, 3(6) 2010, pp.583-594.
 - [139] D. Kumar, T.C. Aseri and R.B. Patel. EECDA: Energy Efficient Clustering and Data Aggregation Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks, *Int. J. of Computers, Communications & Control*, 6(1) 2011, pp.113-124.

- [140] H. Aoudia, Y. Touati, A. Ali-Cherif and P. Greussay. Hierarchical Routing Approach-Based Energy Optimization in Wireless Sensor Networks, The 10th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MOBIWAC'12, pp.131-134, Paphos, (Cyprus), October 2012.
- [141] H. Aoudia, Y. Touati, P. Greussay and A. Ali-Cherif. Energy Optimization in Wireless Sensor Networks, The 11th International Conference on Wireless Networks, World Congress in Computer Science, Computer Engineering and applied Computing, ICWN'12, WORLCOMP'12, pp.470-475, Las Vegas, Nevada (USA), July 2012.
- [142] H. Aoudia, Y. Touati, A. Ali-Cherif and P. Greussay. Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil, MajecSTIC'12, Manifestation des Jeunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, Lille, (FRANCE), 29-31 Octobre 2012.
- [143] H.T. Friis. Proc. Friis transmission equation, in IRE, vol. 34, pp. 254, 1946.
- [144] T.S. Rappaport. Wireless Communications, Principles & Practices. Prentice Hall, 1999.
- [145] V. Rajendran, K. Obraczka and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks, in Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York (NY), 2003, pp.181-192.
- [146] T.S. Rappaport. Wireless communications: Principles and practice, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [147] P. Levis, N. Lee, M. Welsh and D. Culler. TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications. *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, New York (NY), 2003, pp.126-37.
- [148] P. Levis, S. Madden, D. Gay, J. Polastre and R. Szewczyk, A. Woo, E. Brewer, D. Culler. The emergence of networking abstractions and techniques in TinyOS. *Proceedings of the 1st USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, vol.1, Berkeley (CA), 2004, pp.1-14.
- [149] P. Levis and D. Gay. TinyOS Programming, 1st edition, Cambridge University Press, April 2009
- [150] D. Gay, P. Levis, R. Von-Behren, M. Welsh, E. Brewer and D. Culler. The NesC language: A holistic approach to networked embedded systems. *ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, San Diego (CA), June 2003, pp.1-11.
- [151] D. Munoz, F. Bouchereau, C. Vargas and R. Enriquez-Caldera. Position location techniques and applications, Elsevier, ISBN. 978-0-12-374353-4, April 2009.
- [152] H. Aoudia, Y. Touati and A. Ali-Cherif. Wireless Sensor Networks Lifetime Extension based on a New Hybrid Hierarchical Routing Mechanism, Book Chapter in Wireless Internet, ISBN 978-3-319-18802-7, 2015 (146) pp.262-270.
- [153] H. Aoudia, Y. Touati and A. Ali-Cherif. Wireless Sensor Networks Lifetime Extension based on a New Hybrid Hierarchical Routing Mechanism, The 8th International Wireless Internet Conference - Symposium on Wireless and Vehicular Communication, WICON 2014, Lisbon (Portugal), November 2014.
- [154] H. Aoudia, Y. Touati, E.H. Teguig and A. Ali-Cherif. Hybrid Hierarchical Routing Protocol for WSN Lifetime Maximization, International Conference on Wireless Communications and Applications, ICWCA 2014, pp.928-934, Barcelona (Spain), October 2014.

-
- [155] H. Aoudia, Y. Touati and A. Ali-Cherif. Energy Optimization Mechanism in Wireless Sensor Networks, MobilWare 2013, pp.94-99, Bologna (Italy), December 2013.
 - [156] H. Aoudia, Y. Touati and A. Ali-Cherif. Energy-efficient routing protocol based on a dynamic clustering mechanism for WSN applications, The 11th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MOBIWAC'13, pp.89-92, Barcelona, (Spain), November 2013.
 - [157] Y. Touati, H. Aoudia, A. Ali-Cherif and M. Demri. Position location technique in wireless sensor network using rapid prototyping algorithm, Book Chapter in Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering, INTECH Publisher, ISBN 978-953-307-698-0, 2011 (16) pp.291-306
 - [158] Y. Touati, H. Aoudia and A. Ali-Cherif. Intelligent Wheelchair localization in wireless sensor network environment: A fuzzy logic approach, 5th IEEE International Conference on Intelligent Systems, IS'10, pp.408-413, London, (UK), July 2010.
 - [159] Y. Touati, A. Ali-Cherif, H. Aoudia and M. Demri. Virtual Impedance Approach for Smart Wheelchair Monitoring via Wireless Communication Network, International Conference on Embedded Systems and Applications ESA'11, World Congress in Computer Science, Computer Engineering and applied Computing, WORLDCOMP'11, pp.34-39, Las Vegas, Nevada (USA), July 2011.
 - [160] Y. Touati, A. Ali-Cherif, H. Aoudia and M. Demri. An Embedded Control Architecture for Smart Wheelchair Navigation via Wireless Network, IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI'11, pp.492- 493, Las Vegas, Nevada (USA), August 2011.
 - [161] Y. Touati, H. Aoudia and A. Ali-Cherif. Virtual Impedance Approach for Smart Wheelchair Monitoring via Wireless Communication Network, International Journal of Advanced Computer Science, 3 (4) 175-183, 2013.
 - [162] H. Aoudia, Y. Touati, L. Seddiki and A. Ali-Cherif. Création d'outils informatiques pour le suivi et l'assistance aux personnes à mobilité réduite: localisation, routage et sécurité, 3SGS'10, 3^{ème} Workshop du Groupement d'Intérêt Scientifique : Surveillance, Sûreté, et Sécurité des Grands Systèmes, Reims, (FRANCE), 29-30 Septembre 2010.
 - [163] L. Boubchir, Y. Touati, B. Daachi and A. Ali-Cherif. EEG Error Potentials Detection and Classification using Time-Frequency Features for Robot Reinforcement Learning, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2015, pp.1761-1764, Milano (Italy), August 2015.

Annexe

Annexe A : Routines NesC pour l'implémentation du protocole HHRP

Annexe B : Plateforme d'acquisition et d'exploitation des données capteurs

Annexe A

Routines NesC pour l'implémentation du protocole HHRP

A.1 Routine d'initialisation du nombre de CH par la station de base

N étant le nombre de NC dans le RCSF

```
static void init()
{
    If (TOS_LOCAL_ADDRESS == BASE_STATION_ADDRESS) {
        // Intermediary variable initialization "number of rounds"
        r = -1;
        // CH number: 10%
        K = (uint16_t) N*10/100;

        If (K==0){
            K++;
        }
        // Depth initialization
        IN_Depth = TRUE;
        Depth = 0;

        // Display control
        dbg(DBG_USR2, "HHRP – CH number : %i\n", K);
    }
}
```

A.2 Routine de calcul de la probabilité au niveau de la station de base

```
static void emission()
{
    if (TOS_LOCAL_ADDRESS == BASE_STATION_ADDRESS){
        RC=TRUE;

        // Round incrementation
        r++;

        // Compute probability Pr
        Pr = (float) K/(N-K*(r%(N/K)));
        ptr = (struct PUIITS*)(buffer.data);
        ptr->round = r;
        ptr->probability = Pr;
        ptr->ID = BASE_STATION_ADDRESS;
        ptr->Depth = 0;
        IN_Depth = TRUE;

        Call HHRP_SendMsg.send(
            TOS_BCAST_ADDR,sizeof(struct PUIITS),&buffer);

        // New round
        ptr->r = round % (N/K);
        dbg(DBG_USR2, "Current round : %i\n",r);
    }
}
```

A.3 Routine d'envoi de messages d'appartenance à un cluster

```
static void Membership_MN_CH()
{
    dbg(DBG_USR2, " %i \n ",TOS_LOCAL_ADDRESS);
    dbg(DBG_USR2, " %i \n", ID_CH_GATE);

    ptrM = (struct MN*)(buffer.DATA);
    ptrM->ID_MN = TOS_LOCAL_ADDRESS;
    ptrM->ID_CH = ID_CH_GATE;
    ptrM->req = 1;

    call ORGANISATION_SendMsg.send(
        TOS_BCAST_ADDR, sizeof(struct MN), &buffer);
}
```

A.4 Routine de traitement au niveau CH des données perçues des NMs

```
// Required parameters for round initialization
```

```
Route_Table_R = 0
```

```
event TOS_MsgPtr ORGANISATION_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)
{
    ptrM = (struct MEMBRE *)(pmsg->DATA);

    if(ptrM ->ID_CH==TOS_LOCAL_ADDRESS){
        if (ptrM->req==1){
            // MN membership reception for a given cluster with ID_CH
            dbg(DBG_USR2,"CH:%i\n", ptrM->ID_CH);
            dbg(DBG_USR2," MN:%i\n", ptrM->ID_MN);
            // Routing table incrementing
            Route_Table_MN= Route_Table_MN +1;
            ptrCH = (struct CLUSTER_HEAD*)(pmsg->data);
            ptrCH -> ID_MN =ptrM-> ID_MN;
            ptrCH ->ID_CH=TOS_LOCAL_ADDRESS;
            ptrCH ->SLOT_MN = Route_Table_MN;
            callSLOT_SendMsg.send(
                ptrCH->ID_MN,sizeof(struct CLUSTER_HEAD),&pmsg->data);
        }
        else{
            if (ptrM->req==2){
                // Displaying Cluster Head, Temperature and associated Node
                // Member
                dbg(DBG_USR2, " CH :%i\n", ptrM->ID_CH);
                dbg(DBG_USR2, " DATA_TEMP :%i\n", ptrM->TEMP);
                dbg(DBG_USR2, " MN :%i\n", ptrM->ID_MN);
                // Mean TEMPERATURE
                MEAN_TEMP = MEAN_TEMP + (ptrM->TEMP);
                // DATA AGREGATION
                Route_Table_R = Route_Table_R+1;
                ptrCH ->NBR_MBR= Route_Table_R;
                call AggregerTimer.start(TIMER_ONE_SHOT,
                    ((Route_Table_MN)*(SLOT_LENGTH)));
            }
        }
    }
    return pmsg;
}
```

A.5 Routine de communication CH - Station de Base

```
event TOS_MsgPtr HHRP_ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr pmsg)
{
    ptr = (struct PUIITS *)(pmsg->data);
    if (!depth_recu) {
        TOS_LOCAL_ADDRESS,ptr->round,ptr->ID);
        Depth=ptr->Depth+1;
        IN_Depth =TRUE;
        // Depth display
        dbg(DBG_USR2, "Depth is: %i\n",Depth);
        dbg(DBG_USR2, "MN %i has Depth of :%i\n",ptr->ID,ptr->Depth);
    }
    if(rCH<ptr->round){
        Depth_CH_Init=0xff;
        round_CH=FALSE;
        rCH=ptr->round;
        probability=ptr->probability;
        recu=FALSE;
    }
}
```

Annexe B

Plateforme d'acquisition et d'exploitation des données capteurs

B.1 Application DELPHI pour la récupération des données capteurs

L'ensemble des données relatives à l'application sont récupérées sous format TRACE puis exploitées de manière automatique via une plateforme développée sous DELPHI.

The screenshot displays the DELPHI application interface. At the top, a table titled 'Les Messages' lists various messages and their corresponding counts under the column 'Le Nombre'. Below the table is a blue 'Ouvrir' button. A blue arrow points from the 'Ouvrir' button to a preview window below. The preview window shows a detailed view of the messages and their counts, along with a list of messages in a scrollable area.

Les Messages	Le Nombre
le neoud xx dont j'ai reçu le msg	0
j'appartient au CH	0
il enverra les données avec un code CDMA de	0
mon slot est de	0
Je suis le CH xx j'ai reçu la température	0
j'ai reçu l'aggrégation température	0

Ouvrir

Below the main table, there are two preview windows showing detailed data:

Left Preview Window:

Les Messages	Le Nombre
le neoud xx dont j'ai reçu le msg	4
j'appartient au CH	3
il enverra les données avec un code CDMA de	5
mon slot est de	7
Je suis le CH xx j'ai reçu la température	1
j'ai reçu l'aggrégation température	4

Ouvrir

Right Preview Window:

Les Messages	Le Nombre
le neoud xx dont j'ai reçu le msg	29
j'appartient au CH	448
il enverra les données avec un code CDMA de	152
mon slot est de	67
Je suis le CH xx j'ai reçu la température	67
j'ai reçu l'aggrégation température	11

Ouvrir

Below the preview windows, there is a list of messages in a scrollable area:

0: j'ai reçu l'aggrégation température 19, ou CH 6
 0: j'ai reçu l'aggrégation température 19, ou CH 6
 4: le neoud 0 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 4: le neoud 02 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 4: le neoud 022 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 4: le neoud 0222 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 14: j'appartient au CH 15
 14: j'appartient au CH 15
 15: il enverra les données avec un code CDMA de 43
 15: il enverra les données avec un code CDMA de 43
 15: il enverra les données avec un code CDMA de 43
 15: il enverra les données avec un code CDMA de 43
 15: il enverra les données avec un code CDMA de 43
 19: mon slot est de 1
 19: mon slot est de 1
 19: mon slot est de 1
 19: mon slot est de 1
 19: mon slot est de 1

0: MHLeachPDM - je suis le PUTS
 0: MHLeachPDM - initialise le round à zéro
 0: MHLeachPDM - le nombre le CH désiré pour chaque round est: 10
 0: la probab est 0.1
 0: la probabilité que chaque neoud devienne CH dans ce round est 0.100000
 4: le neoud 0 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 4: j'ai reçu le msg du neoud 0
 4: je suis le neouds 4 je désire être CH
 4: j'ai reçu le début du round=0
 4: le nombre aléatoire que j'ai généré est = 0.257780
 24: le neoud 0 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 24: j'ai reçu le msg du neoud 0
 24: je suis le neouds 24 je désire être CH
 24: j'ai reçu le début du round=0
 24: le nombre aléatoire que j'ai généré est = 0.200140
 8: le neoud 0 dont j'ai reçu le msg est de est de profondeur 0
 8: j'ai reçu le msg du neoud 0
 8: je suis le neouds 8 je désire être CH
 8: j'ai reçu le début du round=0
 8: le nombre aléatoire que j'ai généré est = 0.107470

B.2 Application JAVA pour l'exploitation des données capteurs

Les informations récupérées sont exploitées sur une plateforme JAVA en fonction des protocoles implémentés : LEACH, TEEN, HHRP et HRP-DCM.



Glossaire

AOA	Angle Of Arrival
AODV	Adhoc On Demand Distance Vector
APTEEN	Adaptive Periodic TEEN
AQFSN	Active Query Forwarding in Sensor Networks
ASCENT	Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies
B-MAC	Berkeley MAC
CADR	Constrained Anisotropic Diffusion Routing
CPU	Central Processing Unit
CRC	Code Cyclique Redondant (Cyclical Redundancy Check)
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance
D-MAC	Dynamic MAC
DSP	Digital Signal Processor
DSR	Dynamic Source Routing
EACHS	Energy Adaptive Cluster-Head Selection
FEED	Fault tolerant, Energy Efficient, Distributed Clustering
FLAMA	FLow-Aware Medium Access
GAF	Geographical Adaptive Fidelity
GBR	Gradient-Based Routing
GDIR	Geographic DIstance Routing
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GMRE	Greedy Maximum Residual Energy
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GOAFR	Greedy Other Adaptive Face Routing
GRF	Geographic Random Forwarding
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering
HHRP	Hybrid Hierarchical Routing Protocol
H-PEGASIS	Hierarchical-PEGASIS
HRP-DCM	Hybrid Routing Protocol based on Dynamic clustering Method
IDSQ	Information-Driven Sensor Querying
ISO	International Standards Organization

LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LEACH-H	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Medium Access Control
MCFA	Minimum Cost Forwarding Algorithm
MECN	Minimum Energy Communication Network
MFR	Most Forward within Radius
NiMH	Nickel-Metal Hydride
M-LEACH	Multi-hop LEACH
MULE	Mobile Ubiquitous LAN Extensions
OSI	Open Systems Interconnection
PEGASIS	Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems
QoS	Quality of Service
RR	Rumor Routing
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indication
SAR	Sequential Assignment Routing
SGNFD	Stateless Geographic Non-Deterministic forwarding
SMECN	Small Minimum-Energy Communication Network
S-MAC	Sensor MAC
SOP	Self Organizing Protocol
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TBF	Trajectory-Based Forwarding
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference Of Arrival
TEEN	Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
Tiny-OS	Tiny-Operating System
TL-LEACH	Two Level-LEACH
T-MAC	Timeout MAC
TOA	Time Of Arrival
TOSSIM	TinyOS-SIMULATOR
TRAMA	TRaffic-Adaptive Medium Access
UV	Unité de Valeur
V-LEACH	Vice-LEACH
WBAN	Wireless Body Area Networks

Liste des figures

	Pages
Figure 1.1 Evolution du réseau dans le temps	9
Figure 1.2 Trafic dans le réseau	10
Figure 2.1 Vue globale d'un RCSF	13
Figure 2.2 Pile protocolaire d'un modèle RCSF	13
Figure 2.3 Niveaux de consommation d'énergie d'un capteur	14
Figure 2.4 Architecture physique d'un capteur	15
Figure 2.5 Répartition de la consommation des ressources	16
Figure 2.6 Taxonomie des techniques de consommation d'énergie	17
Figure 2.7 Taxonomie des techniques basées sur la partition du temps	17
Figure 2.8 Taxonomie des techniques orientées données	20
Figure 2.9 Taxonomie des techniques basées sur la mobilité des nœuds	22
Figure 2.10 Transbordement des messages dans un RCSF	23
Figure 2.11 RCSF avec relais mobile	23
Figure 3.1 Mécanismes de routage dans les RCSF	29
Figure 3.2 Architecture centralisée à topologie plate	30
Figure 3.3 Organigramme du protocole de routage à diffusion dirigée	32
Figure 3.4 Architecture distribuée à topologie hiérarchique	35
Figure 3.5 Phases de mise en œuvre du protocole LEACH	35
Figure 3.6 Fonctionnement des protocoles TEEN et APTEEN	38
Figure 3.7 Algorithme de (a) construction de chaîne (b) passage de jeton	39
Figure 3.8 Localisation des nœuds CH, PCH et SN dans le réseau	41
Figure 3.10 Diagramme de transition d'états	42
Figure 3.11 Formation de nœuds coordinateurs	44
Figure 3.12 Taux de consommation énergétique dans un RCSF	49

Figure 4.1 Phases de mise en œuvre du protocole LEACH	52
Figure 4.2 Phases de formation des CHs	53
Figure 4.3 Synoptique de bases du mécanisme HHRP	54
Figure 4.4 Architecture du hiérarchisée du réseau	55
Figure 4.5 Architecture hiérarchisée du RCSF	56
Figure 4.6 Modèle de consommation d'énergie	57
Figure 4.7 Comportement d'un nœud capteur dans un RCSF selon le protocole HHRP	59
Figure 4.8 Exemple d'envoi d'un message d'initialisation	60
Figure 4.9 Exemple de diffusion de statut et d'envoi de messages d'appartenance	62
Figure 4.10 Pseudo-code d'appartenance à un cluster	63
Figure 4.11 Répartition des Time slots dans un cluster	64
Figure 4.12 Agrégation des données dans un cluster	64
Figure 4.13 Mode opératoire d'un (a) NM et d'un (b) CH	65
Figure 4.14 Communication multi-sauts $CH_{FILS} - CH_{PARENT}$	67
Figure 4.15 Communication multi-sauts $CH_{FILS} - SB$	68
Figure 4.16 Simple routine de sélection du chemin optimal	69
Figure 4.17 Pseudo-code de sélection de chemin optimal	70
Figure 4.17 Mécanisme de routage HHRP	73
Figure 4.18 Pseudo-code du mécanisme de routage HHRP	75
Figure 4.17 Capteur MicaZ avec spécifications	77
Figure 4.18 Energie résiduelle dans les différents RCSF	79
Figure 4.19 Energie résiduelle vs. Radio et CPU	80
Figure 4.20 Longévité des réseaux	81
Figure 4.21 Evolution de la topologie du réseau	82
Figure 3.22 Nombre de clusters vs. Densité	82
Figure 5.1 Mécanisme de calcul des distances	88
Figure 5.2 Appartenance à un cluster	88
Figure 5.3 Pseudo-code d'appartenance à un cluster. Approche HRP-DCM	89
Figure 5.4 Pseudo-code de sélection de chemin optimal. Approche HRP_DCM	90
Figure 5.5 Comportement d'un nœud capteur dans un RCSF selon le protocole HRP-DCM	91
Figure 5.6 Pseudo-code du mécanisme de routage HRP-DCM	93
Figure 5.7 Consommation énergétique	94

Figure 5.8 Optimisation de la communication multi-sauts $CH_{FILS} - CH_{PARENT}$	95
Figure 5.9 Longévité du réseau	96
Figure 5.10 Clusterisation du RCSF	97
Figure 5.11 Trafic dans le réseau	98
Figure 5.12 Délais de reconnaissance du voisinage et de clusterisation	99

Liste des tableaux

	Pages
Tableau 1.1 Energie dissipée dans un réseau à 50 nœuds	9
Tableau 2.1 RCSF vs. Réseau Adhoc	12
Tableau 3.1 Comparaison entre SPIN, LEACH and Diffusion Dirigée	37
Tableau 3.1 Sources de consommation d'énergie	49
Tableau 4.1 Paramètres expérimentaux	78
Tableau 5.1 Energie dissipée dans un réseau à 50 nœuds	96
Tableau 5.2 Energie dissipée dans un réseau à 500 nœuds	97

Publications personnelles

Revues Internationales avec comité de lecture

1. Aoudia, H., Touati, Y. & Ali-Cherif, A. Hierarchical Routing Protocol for Energy Optimization in Wireless Sensor Networks, Journal of Wireless Networking and Communications. (Soumis).
2. Touati, Y., Aoudia, H. & Ali-Cherif, A. Virtual Impedance Approach for Smart Wheelchair Monitoring via Wireless Communication Network, International Journal of Advanced Computer Science, 3 (4) 175-183, 2013.

Chapitres de livres

1. Aoudia, H., Touati, Y., & Ali-Cherif, A. (2015). Wireless Sensor Networks Lifetime Extension based on a New Hybrid Hierarchical Routing Mechanism, Book Chapter in Wireless Internet, ISBN 978-3-319-18802-7, (146) pp.262-270.
2. Touati, Y., Aoudia, H., Ali-Cherif, A. & Demri, M. (2011). Position location technique in wireless sensor network using rapid prototyping algorithm, Book Chapter in Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering, INTECH Publisher, ISBN 978-953-307-698-0, (16) pp.291-306

Conférences Internationales avec comité de lecture

1. Aoudia, H., Touati, Y., & Ali-Cherif, A. Wireless Sensor Networks Lifetime Extension based on a New Hybrid Hierarchical Routing Mechanism, The 8th International Wireless Internet Conference - Symposium on Wireless and Vehicular Communication, WICON 2014, Lisbon (Portugal), November 2014.
2. Aoudia, H., Touati, Y., Teguig, E.H., & Ali-Cherif, A. Hybrid Hierarchical Routing Protocol for WSN Lifetime Maximization, International Conference on Wireless Communications and Applications, ICWCA 2014, pp.928-934, Barcelona (Spain), October 2014.
3. Aoudia, H., Touati, Y. & Ali-Cherif, A. Energy Optimization Mechanism in Wireless Sensor Networks, MobilWare 2013, pp.94-99, Bologna (Italy), December 2013.
4. Aoudia, H., Touati, Y. & Ali-Cherif, A. Energy-efficient routing protocol based on a dynamic clustering mechanism for WSN applications, The 11th ACM International

-
- Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MOBIWAC'13, pp.89-92, Barcelona, (Spain), November 2013.
5. Aoudia, H., Touati, Y., Ali-Cherif, A. & Greussay, P. Hierarchical Routing Approach-Based Energy Optimization in Wireless Sensor Networks, The 10th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MOBIWAC'12, pp.131-134, Paphos, (Cyprus Island), October 2012.
 6. Aoudia, H., Touati, Y., Greussay, P. & Ali-Cherif, A. Energy Optimization in Wireless Sensor Networks, The 11th International Conference on Wireless Networks, World Congress in Computer Science, Computer Engineering and applied Computing, ICWN'12, WORLDCOMP'12, pp.470-475, Las Vegas, Nevada (USA), July 2012.
 7. Touati, Y., Ali-Cherif, H., Aoudia, H. & Demri, M. Virtual Impedance Approach for Smart Wheelchair Monitoring via Wireless Communication Network, International Conference on Embedded Systems and Applications ESA'11, World Congress in Computer Science, Computer Engineering and applied Computing, WORLDCOMP'11, pp.34-39, Las Vegas, Nevada (USA), July 2011.
 8. Touati, Y., Ali-Cherif, H., Aoudia, H. & Demri, M. An Embedded Control Architecture for Smart Wheelchair Navigation via Wireless Network, IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI'11, pp.492- 493, Las Vegas, Nevada (USA), August 2011.
 9. Touati, Y., Aoudia, H. & Ali-Cherif, A. Intelligent Wheelchair localization in wireless sensor network environment: A fuzzy logic approach, 5th IEEE International Conference on Intelligent Systems, IS'10, pp.408-413, London, (UK), July 2010.

Conférences Nationales

1. Aoudia, H., Touati, Y., Ali-Cherif, A. & Greussay, P. Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil, MajecSTIC'12, Manifestation des Jeunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, Lille, (FRANCE), 29-31 Octobre 2012.
2. Aoudia, H., Touati, Y., Seddiki, L. & Ali-Cherif, A. Création d'outils informatiques pour le suivi et l'assistance aux personnes à mobilité réduite: localisation, routage et sécurité, 3SGS'10, 3^{ème} Workshop du Groupement d'Intérêt Scientifique : Surveillance, Sûreté, et Sécurité des Grands Systèmes, Reims, (FRANCE), 29-30 Septembre 2010.

Résumé

La gestion de la consommation énergétique est une question incontournable lors la conception et la mise en œuvre d'un RCSF. Garantir un fonctionnement efficace avec un accroissement de la longévité du réseau en se limitant uniquement à une solution matérielle reste insuffisant. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres solutions logicielles qui permettraient de maîtriser l'exploitation de l'information dès sa source jusqu'à son acheminement vers sa destination finale en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des capteurs, i.e., faibles capacités de stockage et de puissance de calcul, et contraintes énergétiques associées. Répondre en partie à ces besoins, passe par le développement d'outils informatiques et de stratégies protocolaires en modes basse consommation mettant en œuvre des mécanismes basés sur des techniques de routage d'informations. Dans cette thèse, nous proposons deux solutions protocolaires hiérarchisées HHRP et HRP-DCM. La première met en œuvre un mécanisme de routage adaptatif à base d'un modèle énergétique non linéaire et d'un concept de communication Fils-Parent pour la sélection des meilleurs chemins en tenant compte d'un ensemble de paramètres critiques tels que les distances source-cible, la puissance du signal et l'énergie consommée. Or, la phase de reconnaissance du voisinage nécessite l'utilisation de la puissance des signaux radio pour estimer les distances entre nœuds capteurs, ce qui est un inconvénient majeur puisque cela peut engendrer des dégradations sur les performances du routage et des erreurs d'estimation des mesures RSSI. Ces dernières ne sont exploitables pour la localisation des nœuds qu'au bout d'un certain temps vu que la stabilité du signal n'est garantie que tardivement. Ainsi, le temps alloué pour la phase de reconnaissance devient important, accélérant de ce fait la consommation d'énergie et donc minimise la durée de vie du réseau. Pour y remédier, nous proposons une alternative qui contourne l'utilisation de la puissance du signal RSSI à tous les niveaux du mécanisme en mettant en œuvre une approche de routage hybride basée sur un mécanisme de clusterisation dynamique HRP-DCM. Cette solution permet des améliorations non seulement lors de la phase de reconnaissance du réseau mais aussi sur l'optimisation des chemins lors de la communication. Elle utilise le concept de calcul des distances temporelles lors du déploiement du réseau ainsi les délais alloués à la phase d'initialisation sont raccourcis atténuant de fait la consommation énergétique et l'exploitation des ressources. L'évaluation des performances montre bien que HRP-DCM optimisent mieux le fonctionnement du réseau quelque soit sa densité comparativement à d'autres solutions telles que HHRP TEEN et LEACH.

Abstract

Managing energy consumption is an unavoidable issue for a WSN design and implementation. Focusing lonely on a hardware solution to ensure an efficient of a running network while increasing its lifetime remains insufficient. It is therefore necessary to turn towards other software solutions that enable a better control of information processing from its source until its final destination by taking into account intrinsic characteristics of sensors, such as low storage and computing capabilities and associated energy constraints. A partial response to these needs requires the development of IT tools and protocolar strategies in low-power modes by implementing mechanisms based on information routing techniques. In this thesis, we propose and develop two hierarchized protocolar solutions HHRP and HRP-DCM. The first one implements an adaptive routing mechanism based on a nonlinear energy model and a concept of communication Son-Parent for a best paths selection by taking into account a set of critical parameters such as distance source-target, signal strength and energy consumption. However, the vicinity recognition phase requires the use of RSSI radio signals to estimate distances between sensor nodes. This can be considered as a major drawback since it may cause damage on routing performances and estimation error on RSSI measurements. These latters can be used for locating nodes only after a while since the stability of RSSI signal is guaranteed only belatedly. Thus, the allocated time for recognition phase becomes significant, speeding up thereby energy consumption and thus reduces the lifetime of the network. In this context, we propose an alternative that bypasses the use of RSSI power signal in different levels of HHRP mechanism by implementing a hybrid routing approach based on a dynamic clustering mechanism HRP-DCM. This solution allows improvements in recognition and in paths optimization phases, both. It uses the concept of temporal distances calculation during network deployment. Thus, allocated time for network initialization is shortened mitigating in fact energy consumption and resources exploitation. Performance evaluation shows that HRP-DCM optimizes better network whatever its density compared to other solutions such as HHRP, TEEN and LEACH routing protocols.