

N° d'ordre: .....

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABÈS DE SIDI BEL ABBÈS  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE  
LABORATOIRE EEDIS

# THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Informatique  
Option : Réseaux des Systèmes Informatiques

Par

M<sup>R</sup> TAIEB BRAHIM MOHAMMED

## CONTRIBUTION AUX RÉSEAUX SANS FIL : ROUTAGE À BASE DE L'ALGORITHME MCL POUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS

Soutenue le 28-07-2021 devant le jury :

Pr.	GAFOUR ABDELKADER	UDL-SBA	Président du jury
Dr.	BEN-NAOUM FARAH	UDL-SBA	Directrice de thèse
Pr.	BOUKLI HACENE SOFIANE	UDL-SBA	Co-Directeur de thèse
Pr.	KESKES NABIL	ESI-SBA	Examineur
Dr.	AMAR BENSABER DJAMEL	ESI-SBA	Examineur
Dr.	BENYAHIA KADDA	U-SAIDA	Examineur

Année Universitaire : 2020 - 2021

*Je dédie cet humble travail à la mémoire de mes défunts parents ...  
à mon épouse et mes enfants ...  
à toute ma famille ...*

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement :

- Ma directrice de thèse, Dr. BEN-NAOUM Farah, pour la confiance qu'elle m'a accordée en dirigeant cette thèse, ses encouragements et son soutien tout au long de ces quatre années.
- Mon co-directeur de thèse Pr. BOUKLI-HACENE Sofiane, pour avoir supervisé et suivi cette thèse. Ses compétences et son expérience dans le domaine des réseaux sans fil ont permis une bonne orientation de mes travaux de thèse.
- Aux membres du jury, Prof. GAFOUR Abdelkader, Prof. KESKES Nabil, Dr. AMAR BENSABER Djamel et Dr. BENYAHIA Kadda, pour avoir accepté d'examiner cette thèse et qui me feront l'honneur d'assister au jury de ma soutenance de doctorat.

# TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL	5
1.1 INTRODUCTION . . . . .	5
1.2 ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR . . . . .	6
1.2.1 Composants matériels . . . . .	6
1.2.1.1 Unité de capture . . . . .	6
1.2.1.2 Unité de traitement . . . . .	6
1.2.1.3 Unité de communication . . . . .	6
1.2.1.4 Unité de contrôle d'énergie . . . . .	6
1.2.1.5 Système de localisation . . . . .	7
1.2.1.6 Mobilisateur . . . . .	7
1.2.1.7 Générateur d'énergie . . . . .	7
1.2.2 Caractéristiques principales d'un capteur . . . . .	8
1.2.3 Architecture logicielle d'un capteur (Pile protocolaire) . . . . .	9
1.2.3.1 Couche physique . . . . .	9
1.2.3.2 Couche liaison de données . . . . .	9
1.2.3.3 Couche réseau . . . . .	9
1.2.3.4 Couche transport . . . . .	9
1.2.3.5 Couche application . . . . .	9
1.2.3.6 Plan de gestion d'énergie . . . . .	9
1.2.3.7 Plan de gestion de mobilité . . . . .	10
1.2.3.8 Plan de gestion de tâches . . . . .	10
1.3 RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .	10
1.4 CARACTÉRISTIQUES ET CONTRAINTES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .	11
1.4.1 Contraintes matérielles . . . . .	11
1.4.2 Auto-configuration . . . . .	12
1.4.3 Tolérance aux pannes . . . . .	12
1.4.4 Évolutivité . . . . .	13
1.4.5 Topologie dynamique des RCSFs . . . . .	13
1.4.5.1 Phase de déploiement . . . . .	13
1.4.5.2 Phase post-déploiement . . . . .	13
1.4.5.3 Phase de redéploiement de capteurs additionnels . . . . .	14

1.4.6	Support de transmission et bande passante . . . . .	14
1.4.7	Couverture et connectivité . . . . .	14
1.4.8	Consommation d'énergie . . . . .	14
1.5	<b>LOCALISATION ET POSITIONNEMENT DES CAPTEURS . . . . .</b>	<b>17</b>
1.5.1	Positionnement des capteurs . . . . .	17
1.5.2	Localisation des capteurs . . . . .	18
1.5.3	Techniques d'estimation des distances . . . . .	18
1.5.3.1	Heure d'arrivée (Time of Arrival ou TOA) . . . . .	19
1.5.3.2	Différence du Temps d'arrivée (Time Difference of Arrival ou TDOA) . . . . .	19
1.5.3.3	Angle d'arrivée (Angle of Arrival ou AOA) . . . . .	19
1.5.3.4	Force du signal (Received Signal Strength Indicator ou RSSI) . . . . .	20
1.5.4	Dérivation des positions . . . . .	20
1.5.4.1	Trilatération . . . . .	20
1.5.4.2	Multilatération . . . . .	21
1.5.4.3	Triangulation . . . . .	21
1.6	<b>DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE CAPTEURS . . . . .</b>	<b>22</b>
1.6.1	Domaine militaire . . . . .	23
1.6.2	Domaine environnemental . . . . .	24
1.6.3	Domaine commercial . . . . .	25
1.6.4	Domaine industriel . . . . .	25
1.6.5	Domaine médical . . . . .	25
1.6.6	Domaine domotique . . . . .	26
1.7	<b>CONCLUSION . . . . .</b>	<b>27</b>
2	<b>TAXONOMIE DU ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1	INTRODUCTION . . . . .	29
2.2	ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	30
2.2.1	Applications temps réel . . . . .	31
2.2.2	Applications non-temps réel . . . . .	31
2.3	SPÉCIFICITÉS DU ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	31
2.4	PROBLÈMATIQUE DE CONCEPTION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	32
2.4.1	Déploiement des capteurs . . . . .	32
2.4.2	Énergie . . . . .	32
2.4.3	Livraison des données . . . . .	32
2.4.4	Capteurs hétérogènes . . . . .	33
2.4.5	Tolérance aux pannes . . . . .	33
2.4.6	Évolutivité . . . . .	33
2.5	TAXONOMIE DU ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	33
2.5.1	Selon la structure du réseau . . . . .	34
2.5.1.1	Routage plat . . . . .	34
2.5.1.2	Routage hiérarchique . . . . .	35
2.5.1.3	Routage géographique . . . . .	36
2.5.2	Selon les opérations du protocole . . . . .	36
2.5.2.1	Routage basé sur la négociation . . . . .	36
2.5.2.2	Routage basé sur les requêtes . . . . .	37
2.5.2.3	Routage basé sur l'agrégation . . . . .	37

2.5.2.4	Routage multi-chemins . . . . .	37
2.5.2.5	Routage basé sur la qualité de service . . . . .	37
2.5.3	Selon les paradigmes de communication . . . . .	38
2.5.3.1	Centré-nœuds (Node-centric) . . . . .	38
2.5.3.2	Centré-données (Data-centric) . . . . .	38
2.5.4	Selon l'établissement de la route . . . . .	38
2.5.4.1	Protocoles proactifs . . . . .	38
2.5.4.2	Protocoles réactifs . . . . .	39
2.5.4.3	Protocoles hybrides . . . . .	39
2.6	PRINCIPAUX PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	39
2.6.1	Routage Plat . . . . .	39
2.6.1.1	Flooding and Gossiping . . . . .	39
2.6.1.2	Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) . . . . .	40
2.6.1.3	Directed Diffusion . . . . .	41
2.6.1.4	Rumor Routing (RR) . . . . .	42
2.6.1.5	COUGAR . . . . .	42
2.6.1.6	Discussion . . . . .	43
2.6.2	Routage Hiérarchique . . . . .	44
2.6.2.1	LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) . . . . .	44
2.6.2.2	PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) . . . . .	46
2.6.2.3	TEEN (Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network) et APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network) . . . . .	47
2.6.2.4	Discussion . . . . .	49
2.6.3	Routage Géographique . . . . .	50
2.6.3.1	GAF (Geographic Adaptative Fidelity) . . . . .	50
2.6.3.2	GEAR (Geographic and Energy Aware Routing) . . . . .	51
2.6.3.3	Discussion . . . . .	52
2.6.4	Routage basé sur la Qualité de Service . . . . .	53
2.6.4.1	SAR (Sequential Assignment Routing) . . . . .	53
2.6.4.2	SPEED . . . . .	54
2.6.4.3	Discussion . . . . .	54
2.6.5	Synthèse des principaux protocoles de routage . . . . .	55
2.7	CONCLUSION . . . . .	59
3	CLUSTÉRISASSION DANS LE ROUTAGE HIÉRARCHIQUE . . . . .	60
3.1	INTRODUCTION . . . . .	60
3.2	AVANTAGES DE LA CLUSTÉRISASSION . . . . .	62
3.3	DÉFIS DES ALGORITHMES DE CLUSTÉRISASSION . . . . .	62
3.3.1	Énergie limitée . . . . .	63
3.3.2	Ressources limitées . . . . .	63
3.3.3	Communication sécurisée . . . . .	63
3.3.4	Formation des clusters et sélection des CHs . . . . .	63
3.3.5	Synchronisation . . . . .	63
3.3.6	Qualité de Service (QoS) . . . . .	64

3.4	OBJECTIFS DE LA CLUSTÉRISATION DANS LES RCSFs . . . . .	64
3.4.1	Évolutivité . . . . .	64
3.4.2	Tolérance aux pannes . . . . .	64
3.4.3	Agrégation/fusion de données . . . . .	65
3.4.4	Équilibrage de charge . . . . .	65
3.4.5	Maximisation de la durée de vie du réseau . . . . .	65
3.4.6	Connectivité accrue . . . . .	66
3.4.7	Réduction du délai d'acheminement . . . . .	66
3.4.8	Évitement des collisions . . . . .	66
3.4.9	Utilisation d'un schéma de veille . . . . .	67
3.5	SCHÉMAS DE CLUSTÉRISATION POUR LES RCSFs . . . . .	67
3.5.1	Schémas auto-organisés . . . . .	67
3.5.1.1	Clustering purement probabiliste . . . . .	67
3.5.1.2	Clustering adaptatif . . . . .	68
3.5.2	Schémas assistés . . . . .	69
3.5.2.1	Clustering assisté par la station de base . . . . .	69
3.5.2.2	Clustering assisté par les CHs . . . . .	70
3.5.3	Schémas à critères multifactoriels . . . . .	70
3.5.3.1	Processus d'Analyse Hiérarchique (PAH) . . . . .	70
3.5.3.2	Le contrôleur en logique flou (CLF) . . . . .	70
3.6	CRITÈRES D'ÉVALUATION DES TECHNIQUES DE CLUSTÉRISATION	71
3.6.1	Critères liés aux clusters . . . . .	71
3.6.1.1	Nombre de clusters . . . . .	71
3.6.1.2	Taille du cluster . . . . .	71
3.6.1.3	Communication intra-clusters . . . . .	71
3.6.1.4	Communication inter-clusters . . . . .	72
3.6.1.5	Affectation des nœuds aux clusters . . . . .	72
3.6.2	Critères liés aux CHs . . . . .	72
3.6.2.1	Types des nœuds . . . . .	72
3.6.2.2	Mobilité . . . . .	72
3.6.2.3	Rôle . . . . .	72
3.6.3	Critères liés au processus de clustering . . . . .	73
3.6.3.1	Mode de contrôle . . . . .	73
3.6.3.2	Temps de convergence . . . . .	73
3.6.3.3	Choix des CHs . . . . .	73
3.7	CONCLUSION . . . . .	73
4	CONTRIBUTION : MCL BASED CLUSTERING ROUTING PROTO- COL (MCL-BCRP )	75
4.1	INTRODUCTION . . . . .	75
4.2	ALGORITHME MCL - MARKOV CLUSTER ALGORITHM . . . . .	76
4.2.1	Principe de l'algorithme MCL . . . . .	76
4.2.2	Opérateur d'expansion . . . . .	77
4.2.3	Opérateur d'inflation . . . . .	77
4.2.4	Matrice de Markov . . . . .	78
4.2.5	Pseudo-code de l'algorithme MCL . . . . .	78
4.2.6	Convergence de l'algorithme MCL . . . . .	79
4.2.7	Interprétation des clusters . . . . .	79
4.3	ARCHITECTURE DU PROTOCOLE MCL-BCRP . . . . .	79
4.4	ÉTAPE DE CONFIGURATION . . . . .	80

4.4.1	Phase de détection et de modélisation du RCSF . . . . .	80
4.4.2	Phase de clustérisation et validation . . . . .	81
4.4.3	Phase de sous-clustérisation . . . . .	83
4.4.4	Phase de diffusion de la configuration . . . . .	84
4.5	ÉTAPE DE COMMUNICATION . . . . .	84
4.5.1	Phase de configuration . . . . .	85
4.5.2	Phase stable . . . . .	85
4.6	CONCLUSION . . . . .	86
5	RÉSULTATS DES SIMULATIONS & DISCUSSIONS . . . . .	88
5.1	INTRODUCTION . . . . .	88
5.2	PARAMÈTRES DE SIMULATION . . . . .	88
5.2.1	Modèle des RCSFs . . . . .	88
5.2.2	Modèle énergétique . . . . .	89
5.2.3	Paramètres de base des simulations . . . . .	89
5.2.4	Protocoles de simulation . . . . .	90
5.3	CARACTÉRISTIQUES DU CLUSTERING MCL . . . . .	92
5.4	GRANULARITÉ DU CLUSTERING MCL . . . . .	92
5.5	COUVERTURE DES RCSFs . . . . .	97
5.6	CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RCSFs . . . . .	99
5.7	DURÉE DE VIE DES RCSFs . . . . .	101
5.8	CONCLUSION . . . . .	103
	MES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES . . . . .	105
	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	106
	NOTATIONS . . . . .	108
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	109

## LISTE DES FIGURES

1.1	Exemple de capteur sans fil . . . . .	7
1.2	Architecture matérielle typique d'un capteur sans fil <a href="#">Akyildiz and Vuran [2010]</a> . . . . .	8
1.3	Caractéristiques matérielles de quelques types de capteurs. . . . .	8
1.4	Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil <a href="#">Messai [2019]</a> . . . . .	10
1.5	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil <a href="#">Messai [2019]</a> . . . . .	11
1.6	La répartition de la consommation d'énergie d'un nœud capteur <a href="#">Touati et al. [2017]</a> . . . . .	15
1.7	Modèle énergétique simplifié d'un capteur <a href="#">Akyildiz and Vuran [2010]</a> . . . . .	16



1.8	Processus de localisation dans un réseau de capteurs sans fil <a href="#">Makhoul [2008]</a> . . . . .	18
1.9	Système d'équations de la technique de trilatération. . . . .	20
1.10	Principe de la trilatération <a href="#">[Boushaba, 2007]</a> . . . . .	20
1.11	Principe de la multilatération <a href="#">[Boushaba, 2007]</a> . . . . .	21
1.12	Principe de la triangularisation <a href="#">[Tanvir, 2010]</a> . . . . .	22
1.13	Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil <a href="#">Younes [2012]</a> . . . . .	23
1.14	Analyse d'une zone stratégique avant le déploiement des troupes : domaine militaire <a href="#">Benabbassi [2014]</a> . . . . .	24
1.15	Surveillance des champs de bataille : domaine militaire. . . . .	24
1.16	Surveillance de l'activité volcanique : domaine environnemental <a href="#">Selmic et al. [2016]</a> . . . . .	25
1.17	Surveillance et contrôle d'une raffinerie de pétrole : domaine industriel. . . . .	26
1.18	Surveillance à distance des patients avec maladies chroniques : domaine médical. . . . .	26
1.19	Implantation d'une rétine artificielle pour un patient non voyant : domaine médical <a href="#">Akyildiz and Vuran [2010]</a> . . . . .	27
1.20	Contrôle des maisons intelligentes : domaine domotique. . . . .	27
2.1	Taxonomie des protocoles de routage dans les RCSFs <a href="#">Lindsey et al. [2001]</a> . . . . .	34
2.2	Routage plat <a href="#">Ngom [2016]</a> . . . . .	35
2.3	Routage hiérarchique <a href="#">Ngom [2016]</a> . . . . .	36
2.4	(a) Problème d'implosion : Le nœud A inonde ses données vers tous ses voisins. Le nœud D reçoit deux copies de la même donnée. (b) Problème de chevauchement : Deux capteurs couvrent des régions géographiques qui se chevauchent (A et B). Le nœud C obtient la même copie des données de ces capteurs <a href="#">Matin and Islam [2012]</a> . . . . .	40
2.5	Protocole SPIN : diffusion des annonces <a href="#">Matin and Islam [2012]</a> . . . . .	41
2.6	Protocole de diffusion directe <a href="#">Challal [2008]</a> . . . . .	42
2.7	Protocole LEACH <a href="#">Ababsa [2018]</a> . . . . .	46
2.8	Protocole PEGASIS <a href="#">Ababsa [2018]</a> . . . . .	47
2.9	Formation de la chaîne PEGASIS <a href="#">Akyildiz and Vuran [2010]</a> . . . . .	47
2.10	Protocoles TEEN et APTEEN <a href="#">Samara and Blaou [2017]</a> . . . . .	49
2.11	Protocole GAF <a href="#">Xu et al. [2001]</a> . . . . .	51
2.12	Protocole SAR <a href="#">Sohrabi et al. [2000]</a> . . . . .	54
3.1	Routage basé sur la technique de clustering <a href="#">Rostami et al. [2018]</a> . . . . .	61
4.1	Exemple de graphes avec clusters. . . . .	77
4.2	Architecture du protocole MCL-BCRP. . . . .	80
4.3	Clustérisation MCL avec une convergence de 11 itérations et les paramètres $e_{(i)} = r_{(i)} = 2$ et $k = 4$ . . . . .	82
4.4	Clustérisation MCL validée après élimination des clusters minuscules. . . . .	83
4.5	Exemple d'architecture d'un RCSF avec sous-clusters. . . . .	84

5.1	Différents clusterings avec différentes valeurs de la puissance d'inflation $r$ : (a) Premier Clustering avec $r = 2.5$ (16 clusters) . . . . .	93
5.2	Différents clusterings avec différentes valeurs de la puissance d'inflation $r$ : (b) Deuxième Clustering avec $r = 1.5$ (11 clusters) . . . . .	93
5.3	Différents clusterings avec différentes valeurs du paramètre de distance seuil $k$ : (a) Premier clustering avec $k = 3$ (8 clusters) . . . . .	94
5.4	Différents clusterings avec différentes valeurs du paramètre de distance seuil $k$ : (b) Deuxième clustering avec $k = 5$ (17 clusters) . . . . .	95
5.5	Variation de la granularité du clustering MCL en fonction de la puissance d'inflation $r$ (avec les valeurs $e = k = 2$ ) . . . . .	95
5.6	Variation de la granularité du clustering MCL en fonction du paramètre de distance seuil $k$ (avec les valeurs $e = r = 2$ ) . . . . .	96
5.7	Granularité du clustering MCL en fonction de la puissance d'inflation et le paramètre de distance seuil. . . . .	96
5.8	Test de dispersion de Poisson des cluster-heads avec les protocoles LEACH et MCL-BCRP. . . . .	97
5.9	Comparaison entre la dispersion de poisson des CHs entre les protocoles LEACH et MCL-BCRP. . . . .	98
5.10	Dispersion aléatoire des CHs avec le protocole LEACH. . . . .	98
5.11	Dispersion uniforme des CHs avec le protocole MCL-BCRP. . . . .	99
5.12	Énergie moyenne dissipée par round avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED. . . . .	100
5.13	Tableau comparatif montrant la dissipation moyenne de 50% et 100% de l'énergie initiale avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED. . . . .	100
5.14	Durée de vie des protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED. . . . .	102
5.15	Nombre des capteurs morts par round avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED. . . . .	102

## LISTE DES TABLEAUX

2.1	Synthèse des principaux protocoles de routage. . . . .	56
2.2	Avantages et inconvénients majeurs des principaux protocoles de routage. . . . .	57
2.3	Avantages et inconvénients majeurs des principaux protocoles de routage (suite). . . . .	58
5.1	Paramètres de base des simulations . . . . .	90

5.2	Comparaison conceptuelle entre les protocoles de simulation. . . . .	91
-----	--	----

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

LES récentes avancées dans le domaine des systèmes micro-électromécaniques (MEMS), associées aux développements significatifs dans le domaine du traitement numérique du signal (DSP), ont conduit à une révolution industrielle dans le domaine des micro-capteurs. La mise en œuvre sans fil de ces micro-capteurs a permis un déploiement à grande échelle pour former des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Matin and Islam \[2012\]](#), [Vijayalakshmi and Muruganand \[2018\]](#).

Durant les deux dernières décennies, une attention particulière a été accordée aux réseaux de capteurs sans fil. En effet, les RCSFs ont été largement utilisés dans différents domaines d'application : militaire [Priyantha \[2005\]](#), contrôle industriel [Levis et al. \[2003\]](#), surveillance environnementale [Stehlík \[2011\]](#), santé [Dishongh and McGrath \[2009\]](#), [Julien-Vergonjanne et al. \[2016\]](#), la surveillance domestique et des maisons intelligentes [Ilakkiyadeepaa et al. \[2015\]](#), [Cetinkaya and Akan \[2016\]](#), [Gnanavel et al. \[2016\]](#).

Grâce à leur forte baisse des coûts et les améliorations tangibles de leurs capacités de stockage et de traitement, les nœuds capteurs (appelés également nœuds ou capteurs) seront sûrement omniprésents dans notre vie quotidienne dans un avenir proche reliant l'environnement physique et le monde numérique virtuel. En général, un RCSF se compose d'un grand nombre de minuscules nœuds capteurs répartis sur une grande zone avec un ou plusieurs stations de base (BS) collectant des informations à partir de ces nœuds capteurs. Tous les nœuds capteurs ont des capacités de détection d'informations, de traitement de données et de communication sans fil mais avec une alimentation électrique limitée. Contrairement aux nœuds capteurs, la station de base dispose d'une source d'énergie illimitée avec une grande puissance de calcul et une capacité de stockage importante pour traiter et stocker les données reçues. Ces données peuvent être exploitées sur place ou acheminées vers des utilisateurs distants via Internet [Selmic et al. \[2016\]](#), [Fahmy \[2016\]](#), [Forster \[2016\]](#).

Le déploiement massif de ces nœuds capteurs à grande échelle nécessite une étude approfondie des protocoles de routage à mettre en œuvre afin d'assurer une transmission de données fiable dans des délais raisonnables, tout en tenant compte des contraintes d'énergie inhérentes aux RCSFs. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries limitées et laissés sans surveillance une fois déployés. Par conséquent, les protocoles

de routage proposés pour les RCSFs doivent non seulement relever les défis relatifs à la qualité de service (QoS) des applications, la tolérance aux pannes, l'évolutivité et la fiabilité des données, mais aussi les capacités limitées de ce type de réseaux en matière de stockage, d'énergie, de traitement, de mémoire et de communication, ainsi que les changements imprévisibles et fréquents de la topologie dus à la mobilité et à la défaillance des nœuds.

Le problème principal des réseaux de capteurs sans fil est la gestion de la consommation d'énergie. Par conséquent, la conception de protocoles de routage efficaces est inévitable afin d'augmenter la durée de vie des batteries et donc la longévité des RCSFs. Les protocoles de routage hiérarchiques, permettent aux capteurs de transmettre les données collectées sur de courtes distances aux chefs de clusters (cluster-heads : CHs), plutôt de les communiquer directement à la station de base. Par conséquent, l'énergie consommée durant la communication avec les CHs est inférieure à celle dépensée lors de la transmission vers la station de base. C'est le principal avantage de ce type de protocoles de routage par rapport aux autres. Plusieurs travaux de recherche [Liu \[2012\]](#), [Gupta \[2013\]](#), [Sirsikar and Wankhede \[2015\]](#), [Xu et al. \[2017\]](#) dédiés aux protocoles de routage hiérarchique sont apparus. La couverture des réseaux de capteurs sans fil, considérée comme un indicateur critique de la qualité de service (QoS), est également l'un des problèmes majeurs des RCSFs [Meguerdichian et al. \[2001\]](#), [Selmic et al. \[2016\]](#). L'objectif de la couverture est de déterminer comment un ensemble de nœuds capteurs peut surveiller de manière appropriée une zone d'intérêt. Plusieurs recherches théoriques ont été menées pour étudier le problème de la couverture dans les RCSFs [Tian and Georganas \[2002\]](#), [Adlakha and Srivastava \[2003\]](#), [Kar and Banerjee \[2003\]](#), [Wang et al. \[2003\]](#), [Zhang and Hou \[2005\]](#).

Les protocoles de routage hiérarchiques visent à minimiser la consommation d'énergie et à garantir à la fois l'évolutivité et la couverture des RCSFs [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#). Ces défis nécessitent la mise en œuvre de protocoles permettant l'équilibrage de charge, l'utilisation optimale des bandes passantes des canaux de transmission, la réduction du coût de routage et de la maintenance de la topologie, l'élimination des données redondantes au moyen de l'agrégation, l'élimination des collisions durant le processus de transmission des données et la génération des tables de routage avec des tailles réduites. Les premiers travaux de recherche apparus dans le domaine du routage hiérarchique sont LEACH [Heinzelman et al. \[2000\]](#) et toutes ses variantes, PEGASIS [Lindsey et al. \[2001\]](#), [Lindsey and Raghavendra \[2002\]](#), TEEN [Manjeshwar and Agrawal \[2001\]](#), APTEEN [Manjeshwar and Agrawal \[2002\]](#) et HEED [Younis and Fahmy \[2004\]](#). La principale différence entre les protocoles de routage hiérarchique réside dans la manière dont les CHs sont sélectionnés et les clusters sont formés.

Dans cette thèse, nous proposons un nouveau protocole hiérarchique, que nous avons baptisé MCL-BCRP [Taieb Brahim et al. \[2021\]](#) (MCL-Based Clustering Routing Protocol) permettant :

- d’offrir une couverture appréciable de la zone d’intérêt par l’ensemble de CHs comparée à d’autres protocoles, en particulier le protocole LEACH.
- de prolonger la durée de vie des RCSFs de manière significative en réduisant l’énergie dissipée moyenne et le nombre de nœuds morts par rapport à certains protocoles existants.
- d’offrir la possibilité d’effectuer une configuration hors ligne des RCSFs en fonction des objectifs de l’application utilisant le protocole (durée de vie, couverture et granularité du clustering).

MCL-BCRP combine l’algorithme MCL (Markov CLuster algorithm) pour la formation des clusters et une nouvelle stratégie de sélection de CH basée sur l’emplacement et l’énergie résiduelle des nœuds capteurs. L’algorithme MCL a été développé par Stijn van Dongen afin de simuler des flux stochastiques dans des graphes [Van Dongen \[2000\]](#). L’algorithme MCL a été appliqué dans différents domaines, principalement en bioinformatique. De plus, il s’agit d’une approche largement utilisée pour extraire des informations significatives à partir des réseaux biologiques [Enright et al. \[2002\]](#), [Shih and Parthasarathy \[2012\]](#), [Ochieng et al. \[2016\]](#), [Azad et al. \[2018\]](#).

#### **Organisation de la thèse**

Cette thèse est organisée en cinq (5) chapitres :

- Le premier chapitre expose un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons par détailler les composants matériels ainsi que logiciels d’un capteur puis nous définissons les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite, nous détaillons les contraintes ainsi que les caractéristiques inhérentes à ce type de réseaux. De plus, nous énonçons les techniques de localisation et positionnement des capteurs utilisées pour les RCSFs. Nous concluons ce chapitre introductif par les différents domaines d’application des réseaux de capteurs sans fil.
- Le deuxième chapitre aborde la problématique du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous exposons au début les spécificités du routage dans ce type de réseau. Nous détaillons ensuite les contraintes de conception des protocoles de routage destinés aux RCSFs. Par la suite, une taxonomie du routage dans les réseaux de capteurs est passée en revue selon : la structure du réseau, les opérations du protocole, les paradigmes de communication ainsi que l’établissement des routes. Enfin de ce chapitre, nous exposons une synthèse non exhaustive des protocoles par classe de routage, suivie d’une étude critique de ces différentes classes.
- Le troisième chapitre s’intéresse à la problématique de clustérisation (ou plus simplement le clustering). Nous montrons tout d’abord, les avantages de cette technique par rapport à la stratégie plate. Nous enchaînons ensuite avec les défis auxquels doivent faire face les algorithmes de clustérisation, les objectifs à atteindre ainsi que les caractéristiques de la technique de clustérisation. Enfin, nous concluons ce chapitre avec les différents schémas de clustérisation dirigés par la sélection des CHs.
- Le quatrième chapitre présente le protocole hiérarchique MCL-

BCRP. La première partie est consacrée à l'algorithme MCL. Nous détaillons le principe de cet algorithme et nous discutons sa convergence. La deuxième partie est dédiée à la description de l'architecture du protocole MCL-BCRP, la construction de la topologie du RCSF et le routage des données depuis les différents membres des clusters jusqu'à la station de base.

- Le cinquième chapitre présente une synthèse des résultats obtenus à partir des simulations effectuées sur le protocole MCL-BCRP et d'autres protocoles de référence issus de la littérature des RCSFs. Nous commençons par étudier les caractéristiques et la granularité du clustering MCL permettant d'effectuer des configurations hors ligne de la topologie des RCSFs. Nous enchainons avec une discussion approfondie des performances du protocole MCL-BCRP comparées au protocole LEACH en termes de couverture des CHs de la zone d'intérêt, ainsi qu'aux protocoles TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED en termes de consommation d'énergie et de durée de vie des RCSFs.

Cette thèse a fait l'objet de publication d'un article scientifique dans le journal "International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies" (IJWNBT) :

Mohammed Taieb Brahim, Houda Abbad, Sofiane Boukil-Hacene (2021), A Low Energy MCL-Based Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies*, 10(1), 70-95.

# RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL



## SOMMAIRE

---

1.1	INTRODUCTION . . . . .	5
1.2	ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR . . . . .	6
1.2.1	Composants matériels . . . . .	6
1.2.2	Caractéristiques principales d'un capteur . . . . .	8
1.2.3	Architecture logicielle d'un capteur (Pile protocolaire) . . . . .	9
1.3	RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .	10
1.4	CARACTÉRISTIQUES ET CONTRAINTES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL . . . . .	11
1.4.1	Contraintes matérielles . . . . .	11
1.4.2	Auto-configuration . . . . .	12
1.4.3	Tolérance aux pannes . . . . .	12
1.4.4	Évolutivité . . . . .	13
1.4.5	Topologie dynamique des RCSFs . . . . .	13
1.4.6	Support de transmission et bande passante . . . . .	14
1.4.7	Couverture et connectivité . . . . .	14
1.4.8	Consommation d'énergie . . . . .	14
1.5	LOCALISATION ET POSITIONNEMENT DES CAPTEURS . . . . .	17
1.5.1	Positionnement des capteurs . . . . .	17
1.5.2	Localisation des capteurs . . . . .	18
1.5.3	Techniques d'estimation des distances . . . . .	18
1.5.4	Dérivation des positions . . . . .	20
1.6	DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEAUX DE CAPTEURS . . . . .	22
1.6.1	Domaine militaire . . . . .	23
1.6.2	Domaine environnemental . . . . .	24
1.6.3	Domaine commercial . . . . .	25
1.6.4	Domaine industriel . . . . .	25
1.6.5	Domaine médical . . . . .	25
1.6.6	Domaine domotique . . . . .	26
1.7	CONCLUSION . . . . .	27

---

## 1.1 INTRODUCTION

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) représentent un type particulier de réseaux ad hoc. En effet, les RCSFs ne nécessitent pas d'infrastructure préalable et peuvent être déployés dans une zone d'intérêt de manière aléatoire ou déterministe. L'ensemble des nœuds capteurs, ou tout



simplement capteurs, s'auto-configurent de manière dynamique pour former un RCSF. Par la suite, les nœuds capteurs détectent et transmettent des données environnementales de manière autonome vers une entité particulière appelée station de base. Ce chapitre introductif présente l'architecture d'un nœud capteur ainsi que les caractéristiques et les contraintes qui devraient être prises en considération par toute solution destinée aux RCSFs. De plus, nous présentons les techniques de localisation et positionnement des nœuds capteurs de ce type de réseaux. Nous abordons enfin de ce chapitre, une taxonomie non-exhaustive des domaines d'application des RCSFs.

## 1.2 ARCHITECTURE D'UN CAPTEUR

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique de taille réduite avec des ressources limitées, capable de mesurer une valeur physique ou environnementale (température, lumière, pression, humidité, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base appelée puits. Il est surtout utilisé dans les applications de détection et de surveillance. Son architecture physique est généralement composée de quatre unités de base [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

### 1.2.1 Composants matériels

#### 1.2.1.1 Unité de capture

L'unité de capture est chargée d'acquérir les valeurs physiques ou environnementales, telles que la température, l'humidité ou la lumière. Elle est composée de deux sous-unités : un capteur qui génère les signaux analogiques sur la base du phénomène observé et un convertisseur analogique-numérique (ADC) pour faire la conversion en signaux numériques afin d'être exploités par l'unité de traitement.

#### 1.2.1.2 Unité de traitement

L'unité de traitement est le contrôleur principal du nœud capteur sans fil. Elle contrôle tous les autres composants du capteur ainsi que la communication sans fil avec les autres nœuds. C'est une unité intermédiaire entre l'unité de capture et l'unité de communication. Il s'agit d'un micro-contrôleur ou un microprocesseur.

#### 1.2.1.3 Unité de communication

C'est l'unité émetteur-récepteur (transceiver). Elle permet la communication avec les autres nœuds du réseau par des ondes Radiofréquence (RF). Chaque nœud est connecté au réseau par l'intermédiaire de cette unité.

#### 1.2.1.4 Unité de contrôle d'énergie

Elle est matérialisée par une batterie ni rechargeable, ni remplaçable alimentant tous les composants du nœud capteur sans fil. La capacité li-

mitée de la Batterie nécessite un fonctionnement économe en énergie par chaque composant du capteur, surtout l'unité de communication. La préservation d'énergie est la contrainte principale dans toute utilisation d'un RCSEF.



FIGURE 1.1 – Exemple de capteur sans fil.

De plus, des composants supplémentaires peuvent également être ajoutés en fonction de l'application. Ces composants comprennent : un système de localisation, un générateur d'énergie et un mobilisateur [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

#### 1.2.1.5 Système de localisation

Pour certaines applications, il est nécessaire de connaître la position géographique du nœud capteur. Pour cela il doit être équipé d'un système de localisation. Ce système peut être un module GPS (Global Positioning System) ou peut être un module logiciel qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent des informations sur la position du nœud capteur.

#### 1.2.1.6 Mobilisateur

Dans les réseaux de capteurs mobiles, il est nécessaire de doter le nœud capteur par un mobilisateur lui permettant de se déplacer. Cette mobilité nécessite des ressources énergétiques importantes qui devraient être fournies efficacement. Le mobilisateur peut également fonctionner en interaction étroite avec l'unité de capture et l'unité de traitement pour commander les mouvements du nœud capteur.

#### 1.2.1.7 Générateur d'énergie

Tandis que l'énergie de la batterie est principalement utilisée dans les nœuds capteurs, un générateur d'énergie supplémentaire peut être utilisé pour les applications où une longue durée de vie du réseau est exigée. Pour certaines applications, les panneaux solaires sont utilisés pour générer de l'énergie. De même, l'énergie thermique ou cinétique peuvent également être utilisées [Matin and Islam \[2012\]](#).

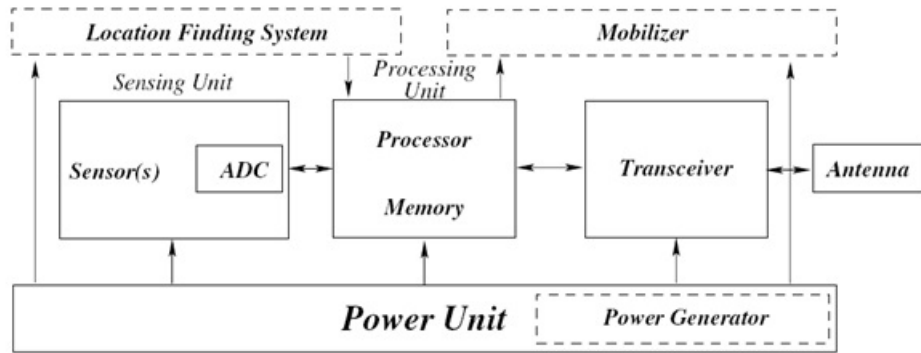


FIGURE 1.2 – Architecture matérielle typique d'un capteur sans fil *Akyildiz and Vuran [2010]*.

### 1.2.2 Caractéristiques principales d'un capteur

**L'étendu de la mesure :** C'est la différence entre le plus petit signal détecté et le plus grand perceptible sans risque de destruction pour le capteur.

**La sensibilité :** c'est la plus petite variation d'une grandeur physique que peut détecter un capteur.

**La rapidité :** c'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information prise en compte par la partie commande.

**La précision :** c'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur proche de la grandeur mesurée.

			
<b>Identification</b>	<b>Mica2Dot</b>	<b>Tmote Sky</b>	<b>LiveNode</b>
<b>Microcontrôleur</b>	<b>ATmega128L</b>	<b>MSP430F</b>	<b>AT91SAM7S</b>
Architecture	8-Bit	16-Bit	32-Bit
Fréquence	8 MHz	8 MHz	50 MHz
Flash	128 Ko	48 Ko	256 Ko
RAM	4 Ko	10 Ko	64 Ko
Mémoire de stockage	512Ko	1024 Ko	-
<b>Module radio</b>	<b>CC1000</b>	<b>CC2420</b>	<b>XBee</b>
Bande de fréquence	315-916 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Débit maximal	38,4 Kb/s	250 Kb/s	250Kb/s

FIGURE 1.3 – Caractéristiques matérielles de quelques types de capteurs.

### 1.2.3 Architecture logicielle d'un capteur (Pile protocolaire)

À la différence des réseaux classiques, les RCSF ont des exigences supplémentaires imposées aux protocoles de communication. Le modèle OSI tel qu'il est défini (sept couches) est trop lourd pour les réseaux de capteurs. Par conséquent, le RCSF utilise une version simplifiée de cinq couches (Application, Transport, Réseau, Liaison de données, Physique) avec trois plans de gestion pour prendre en charge les spécificités du RCSF à savoir l'énergie, la mobilité et les tâches [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

#### 1.2.3.1 Couche physique

La couche physique est responsable de l'envoi et la réception des bits de données sous forme de signaux, de la sélection des fréquences, de la force et la détection du signal.

#### 1.2.3.2 Couche liaison de données

La couche liaison de données est responsable de la formation et la détection des trames, du contrôle d'erreur, du multiplexage, du contrôle des communications point-à-point et point-à-multipoints ainsi que le contrôle d'accès au media assuré par la sous couche MAC [Messai \[2019\]](#).

#### 1.2.3.3 Couche réseau

L'objectif ultime de la couche réseau dans un réseau de capteurs est de trouver le chemin le plus économe en énergie pour acheminer l'information captée à la station de base. Ce routage est caractérisé par l'absence d'un plan d'adressage et par une destination unique (station de base) pour tous les capteurs. Vue son importance pour les réseaux de capteur, le routage a suscité l'attention d'un grand nombre de travaux de recherche [Chalal \[2008\]](#).

#### 1.2.3.4 Couche transport

Cette couche découpe les données en segments et assure un transport de données dans l'ordre, sans erreur, sans duplication et avec un contrôle de flux.

#### 1.2.3.5 Couche application

C'est la couche accessible aux utilisateurs. Elle sert d'interface avec les applications. En plus de l'agrégation et la fusion, les informations captées peuvent être exploitées par diverses applications selon le type du capteur [Ngom \[2016\]](#).

#### 1.2.3.6 Plan de gestion d'énergie

Toutes les fonctionnalités d'un capteur dépendent de la batterie. Donc, elle doit être utilisée de la manière la plus optimale possible. Pour cela, le plan de gestion d'énergie intègre toutes les fonctions pour bien gérer la consommation d'énergie par un capteur. Le récepteur radio d'un capteur

peut par exemple basculer à l'état éteint dès la réception d'un message d'un nœud voisin afin de préserver son énergie [Messai \[2019\]](#). Le capteur peut aussi diffuser une alerte à tous ses voisins dès que sa batterie atteint un certain seuil pour leur signaler qu'il ne pourra plus participer au routage et préserver son énergie uniquement au captage [Ngom \[2016\]](#).

### 1.2.3.7 Plan de gestion de mobilité

Il ya des réseaux de capteurs fixes et des réseaux de capteurs mobiles. Pour ce dernier type de réseaux, vient ce plan de gestion de mobilité pour enregistrer les mouvements du nœud pour lui permettre de connaître sa localisation [Messai \[2019\]](#).

### 1.2.3.8 Plan de gestion de tâches

Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage de charge entre les nœuds capteurs à travers un ordonnancement des tâches de captage afin d'assurer une gestion efficace de l'énergie globale qui permet de prolonger la durée de vie du réseau [Messai \[2019\]](#).

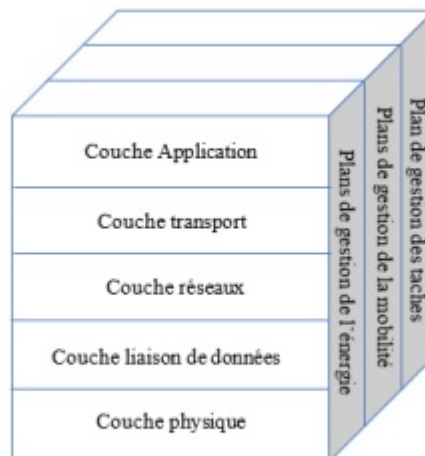


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil [Messai \[2019\]](#).

## 1.3 RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) peuvent être définis comme des réseaux sans fil auto-configurés et sans infrastructure pour mesurer des valeurs physiques ou environnementales, telles que la température, le son, les vibrations, la pression, le mouvement ou la pollution etc. et transmettre en coopération leurs données à travers le réseau à un centre de contrôle via une station de base appelée puits où les données peuvent être observées et analysées afin de prendre des décisions. Un puits ou une station de base agit comme une interface entre les utilisateurs et le

réseau. On peut récupérer les informations requises du réseau en injectant des requêtes et en collectant les résultats à partir du puits. En règle générale, un réseau de capteurs sans fil contient des centaines de milliers de nœuds capteurs. Les nœuds capteurs peuvent communiquer entre eux à l'aide de signaux radio. Un nœud capteur sans fil est équipé de dispositifs de détection et de calcul, d'émetteurs-récepteurs radio et de composants d'alimentation. Les nœuds individuels d'un réseau de capteurs sans fil sont intrinsèquement limités en termes de ressources : ils ont une vitesse de traitement, une capacité de stockage et une bande passante de communication limitées. Une fois les nœuds de capteur déployés, ils sont responsables de l'auto-organisation d'une infrastructure réseau appropriée, souvent avec une communication multi-sauts entre eux. Ensuite, les capteurs embarqués commencent à collecter des informations d'intérêt. Les capteurs sans fil répondent également aux requêtes envoyées depuis un «site de contrôle» pour exécuter des instructions spécifiques ou fournir des échantillons de détection. Le mode de fonctionnement des nœuds de capteur peut être soit continu, soit piloté par événement. Le système de positionnement global (GPS) et les algorithmes de positionnement local peuvent être utilisés pour obtenir des informations de localisation et de positionnement. Les capteurs sans fil peuvent être équipés d'actionneurs pour «agir» dans certaines conditions. Ces réseaux sont parfois plus spécifiquement appelés réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil [Matin and Islam \[2012\]](#), [Akkaya and Younis \[2005\]](#).

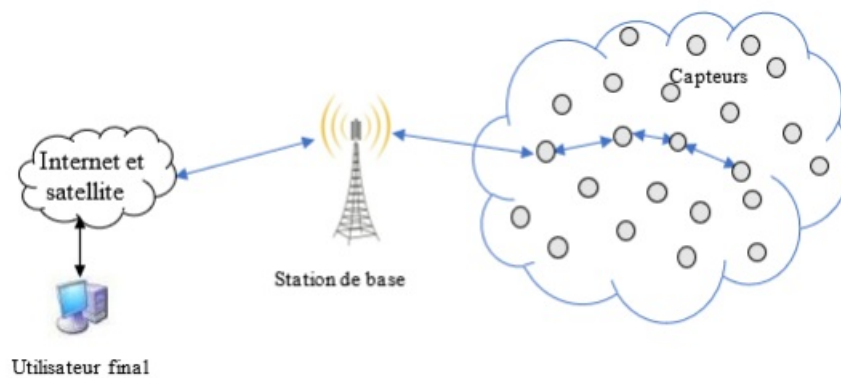


FIGURE 1.5 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [Messai \[2019\]](#).

## 1.4 CARACTÉRISTIQUES ET CONTRAINTES DES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

### 1.4.1 Contraintes matérielles

La taille réduite des nœuds capteurs impose des batteries de petite taille et donc une capacité énergétique limitée. Afin d'utiliser efficacement l'énergie disponible, les capteurs utilisent des microcontrôleurs à faible puissance de calcul et une communication radio à courte portée. Cela constitue des contraintes matérielles pour toute utilisation des capteurs.

### 1.4.2 Auto-configuration

À l'instar des réseaux Ad-Hoc, un réseau RCSF, doit être capable de s'auto-configurer en réseau connecté. En effet, chaque capteur doit collaborer avec ses voisins indépendamment de toute intervention humaine. Cette auto-configuration des réseaux de capteurs est nécessaire parce que l'accès aux capteurs est difficile vu qu'ils sont déployés généralement de manière aléatoire dans des zones d'intérêt hostiles [Karl et al. \[2004\]](#), [Benazzouz \[2013\]](#).

À cause des problèmes matériels ou logiciels, les capteurs peuvent tomber en panne ou subir un blocage temporaire. Le RCSF est un réseau où plusieurs capteurs participent à la surveillance d'un même phénomène physique. La défaillance d'un nœud ou plusieurs jusqu'à un certain niveau ne devrait pas affecter le fonctionnement global du réseau. Ce niveau de défaillance acceptée définit la tolérance aux pannes du réseau. Plus précisément, la tolérance aux pannes d'un réseau de capteurs est définie comme étant sa capacité de maintenir un fonctionnement normal malgré la défaillance de certains de ses nœuds. Quoique la plupart des défaillances soient engendrées par des causes matérielles (épuisement de la batterie ou l'endommagement d'un composant), le logiciel peut aussi provoquer l'arrêt d'un nœud à cause de l'espace mémoire insuffisant et la capacité de traitement limitée. Pour remédier au problème de défaillance des nœuds, les RCSF adoptent la redondance en s'appuyant sur la densité. Par conséquent, même si un nœud capteur tombe en panne, d'autres nœuds peuvent toujours capter et envoyer la même information. L'exigence d'une tolérance aux pannes élevée est étroitement liée au domaine d'application. À titre d'exemple, une grande tolérance aux pannes dans le domaine domotique n'est pas exigée mais dans le domaine militaire doit sûrement être très élevée et les protocoles et algorithmes développés doivent en tenir compte [Hoblos et al. \[2000\]](#), [Shen et al. \[2001\]](#).

### 1.4.3 Tolérance aux pannes

À cause des problèmes matériels ou logiciels, les capteurs peuvent tomber en panne ou subir un blocage temporaire. Le RCSF est un réseau où plusieurs capteurs participent à la surveillance d'un même phénomène physique. Par conséquent, la défaillance d'un nœud ou plusieurs jusqu'à un certain niveau ne devrait pas affecter le fonctionnement global du réseau. Ce niveau de défaillance accepté définit la tolérance aux pannes du réseau. Plus précisément, la tolérance aux pannes d'un réseau de capteurs est définie comme étant sa capacité de maintenir un fonctionnement normal malgré la défaillance de certains de ses nœuds. La plupart des défaillances sont engendrées par des causes matérielles (épuisement de la batterie ou l'endommagement d'un composant), cependant, le logiciel peut aussi provoquer l'arrêt d'un nœud à cause de l'espace mémoire insuffisant et la capacité de traitement limitée. Pour remédier au problème de défaillance des nœuds, les RCSFs adoptent la redondance en s'appuyant sur la densité. Par conséquent, même si un nœud capteur tombe en panne, d'autres nœuds peuvent toujours capter et envoyer la même information. L'exigence d'une tolérance aux pannes élevée est étroitement liée au domaine d'application. À titre d'exemple, une grande tolérance aux pannes

dans le domaine domotique n'est pas exigée mais dans le domaine militaire doit sûrement être très élevée, de plus, les protocoles et les algorithmes développés doivent en tenir compte [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Hoblos et al. \[2000\]](#), [Shen et al. \[2001\]](#).

#### 1.4.4 Évolutivité

La densité des nœuds capteurs déployés sur une région pour détecter un phénomène physique dépend du type de l'application. Pour certaines applications, cette densité peut atteindre des centaines ou des milliers de nœuds, ce qui engendre une charge d'évolutivité supplémentaire à prendre en considération par les protocoles développés pour gérer efficacement ces réseaux. La densité peut aller de quelques centaines de nœuds capteurs dans une région, qui peut avoir un diamètre inférieur à 10 m [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Shen et al. \[2001\]](#).

#### 1.4.5 Topologie dynamique des RCSFs

La topologie d'un RCSF est définie suite au déploiement des nœuds capteurs. Cette opération de déploiement sur le terrain est cruciale pour surveiller efficacement le phénomène à étudier. De plus, la maintenance post-déploiement est importante pour adapter certains paramètres du réseau en fonction de la topologie résultante. Une phase de redéploiement peut être nécessaire si on doit remplacer des nœuds défectueux [Intanagonwiwat et al. \[2000\]](#), [Meguerdichian et al. \[2001\]](#).

##### 1.4.5.1 Phase de déploiement

Le déploiement dépend de l'application mise en œuvre. Il peut être aléatoire (capteurs largués en masse par un avion, projetés par une fusée ou un missile etc.) ou déterministe (capteurs placés de manière individuelle à des endroits bien précis par un humain ou un robot). Cette opération doit promouvoir l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sans pré-organisation ou planification préalable.

##### 1.4.5.2 Phase post-déploiement

Suite à la phase de déploiement, la topologie peut subir des changements pour plusieurs raisons :

- Mouvements des capteurs dans les RCSF mobiles,
- La perturbation de la connectivité des nœuds à cause des interférences, brouillage etc.,
- Défaillance des nœuds,
- L'Etat éteint ou allumé des nœuds.

Ces changements impliquent des opérations différentes de celles du déploiement initial et par conséquent les protocoles utilisés doivent être capables de s'y adapter.



### 1.4.5.3 Phase de redéploiement de capteurs additionnels

Si la tolérance aux pannes du réseau est dépassée, une phase post-déploiement peut être nécessaire pour déployer des nœuds supplémentaires afin de remplacer les nœuds défaillants. Ce changement nécessite la réorganisation du réseau et par conséquent des protocoles de routage appropriés.

### 1.4.6 Support de transmission et bande passante

La fiabilité des communications sans fil entre les nœuds est nécessaire pour le bon fonctionnement des réseaux RCSF. Chaque capteur transmet ses données en multi-sauts via des liens sans fil à bande passante limitée, créés entre des nœuds intermédiaires. Un media sans fil peut être une liaison radio, infrarouge, optique, acoustique. De plus, Le nombre et la taille des messages échangés entre capteurs dans un réseau RCSF doivent être optimisés au maximum, non seulement à cause de la préservation d'énergie mais aussi à cause de la bande passante réduite du réseaux RCSF. Pour des raisons d'interopérabilité, on choisi des supports de communications sans fil disponibles dans tous les pays telle que par exemple les bandes ISM (Industriel, Scientifique et Médical) [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

### 1.4.7 Couverture et connectivité

L'un des objectifs les plus importants d'une bonne gestion énergétique des RCSFs est l'équilibrage de la consommation d'énergie permettant de préserver une bonne couverture de la zone d'intérêt. La couverture consiste à contrôler efficacement la totalité d'une zone géographique pendant toute la durée de vie du réseau. Ce problème se pose sérieusement dans les RCSF à déploiement aléatoire. En effet, la densité des capteurs dans ce cas ne sera pas uniforme sur toute la zone d'intérêt. Les capteurs isolés risquent de se déconnecter du réseau en épuisant rapidement leurs batteries parce qu'ils vont faire plus d'effort dans la communication. Ce qui va provoquer un changement de topologie et une perte de connectivité. Un réseau de capteurs est dit connecté s'il existe, au moins, une route entre chaque paire de nœud. Pour résoudre ce problème, il faut concevoir des protocoles de routage qui tiennent compte de la couverture en préservant l'énergie des capteurs de telle manière que tous les capteurs fournissent le même effort [Meraihi \[2005\]](#).

### 1.4.8 Consommation d'énergie

Les capteurs sans fil ont une source d'énergie limitée sous forme de batteries ( $< 0,5Ah, 1,2V$ ), qui sont ni rechargeables, ni remplaçables. Par conséquent la durée de vie du RCSF est très dépendante de la durée de vie des batteries. En conséquence, les tâches consommatrices d'énergie doivent être bien analysées pour être réalisées de la manière la plus optimale possible. Dans un RCSF, l'acheminement des données à la station de base se fait généralement en multi-sauts où chaque nœud joue deux rôles distincts et complémentaires : capteur source de données et capteur

routeur de données [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

**Source de données :** C'est le rôle du capteur dans le recueillement des données de l'environnement. Ces données sont par la suite traitées et transmises à la station de base à travers des capteurs voisins dans un processus généralement multi-sauts.

**Routeur de données :** En plus du rôle précédent, chaque nœud capteur doit se comporter comme un routeur pour relayer les informations transmises par ses voisins. En effet, chaque nœud capteur qui reçoit les données d'un voisin doit les transmettre à d'autres voisins selon les techniques de routage mises en oeuvre. Cette transmission en multi-sauts est souvent nécessaire à cause de la portée de communication limitée des nœuds capteur dans les RCSF.

Chacun des rôles précédents nécessite une consommation d'énergie plus au moins importante selon l'état opérationnel du nœud capteur. En plus, la défaillance de quelques nœuds peut provoquer un changement significatif de la topologie et par suite le routage. Ainsi, le réacheminement des données par d'autres routes consomme davantage d'énergie. Par conséquent, la gestion de l'optimisation de l'énergie doit être d'une très grande importance dans la conception de tout protocole de routage dans les réseaux RCSF. L'énergie d'un capteur est consommée dans chaque phase opérationnelle à savoir : la détection, le traitement des données, la communication (transmission, réception et écoute) et veille qui sont effectués respectivement par l'unité de capture (Senseur), l'unité de traitement (Processeur), l'unité de communication(Radio) et veille qui est une tâche de fond toujours active. Nous pouvons facilement remarquer qu'un nœud capteur dépense la grande majorité de son énergie dans la communication de données [Touati et al. \[2017\]](#), [Pottie and Kaiser \[2000\]](#).

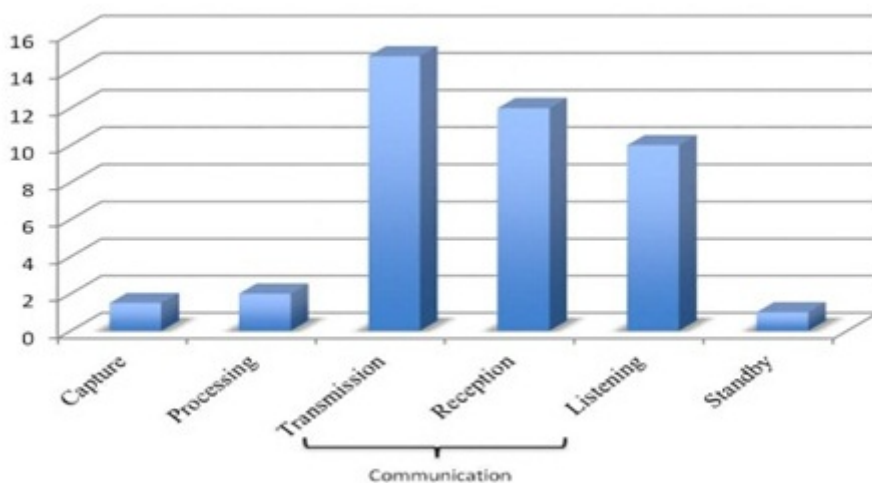


FIGURE 1.6 – La répartition de la consommation d'énergie d'un nœud capteur [Touati et al. \[2017\]](#).

1. **Capture** La puissance de détection dépend de la nature des applications et de la spécificité des capteurs utilisés. La détection événementielle consomme moins d'énergie que la surveillance continue d'un phénomène. Aussi, les perturbations de l'environnement ambiant peuvent compliquer la détection et induire une surconsommation d'énergie. Quoiqu'il en soit, cette phase consomme beaucoup moins d'énergie par rapport à la communication de données.

2. **Traitement des données**

Comme la capture, le traitement des données ne consomme pas beaucoup d'énergie par rapport à la communication des données comme le montre la Figure 1.6. Il a été montré dans Pottie and Kaiser [2000] que le coût énergétique de la transmission d'un seul bit de données sur une distance de 100 m est équivalent à l'exécution de plusieurs millions d'instructions par un microprocesseur. Cette différence importante entre la communication et le traitement des données montre l'importance du traitement local pour optimiser la taille des données à transmettre (élimination de la redondance, l'agrégation et la fusion) pour minimiser l'énergie dépensée dans un réseau de capteurs à routage multi-sauts.

3. **Communication**

C'est la phase la plus consommatrice d'énergie par rapport aux deux phases précédentes comme montre la Figure 1.6. Cette figure montre aussi que l'émission, la réception et l'écoute consomment presque la même quantité d'énergie. En effet, dans une communication à courte portée, l'énergie consommée par l'amplification de la puissance du signal lors de l'émission des données est très minime et par conséquent les coûts énergétiques de l'émission et la réception sont presque similaires pour les courtes distances. Nous pouvons faire une économie significative d'énergie en mettant l'émetteur-récepteur dans un état de veille (éteint) à chaque fois que le nœud capteur n'a pas besoin de transmettre ou de recevoir des données. Cette économie d'énergie peut atteindre plus que 99% (de 59,1 mW à 3 μW) Akyildiz and Vuran [2010].

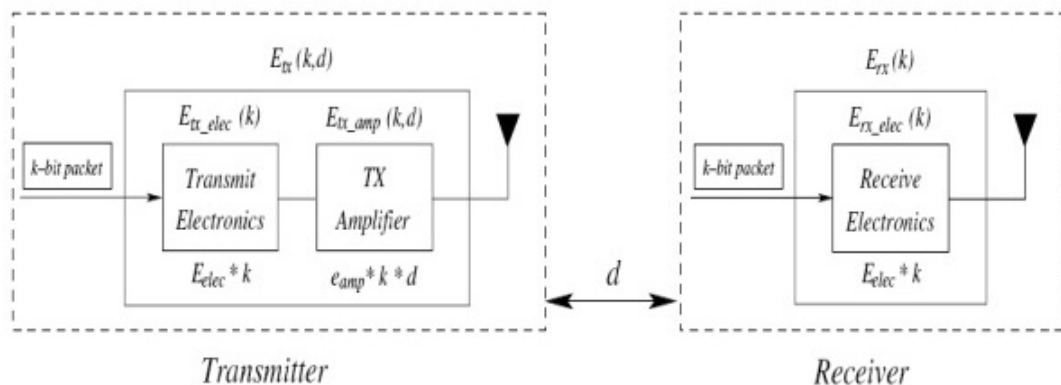


FIGURE 1.7 – Modèle énergétique simplifié d'un capteur Akyildiz and Vuran [2010].

Le modèle de consommation d'énergie peut être simplifié pour une paire émetteur-récepteur séparée par une distance  $d$  comme suit :

$$E_c = E_{tx}(k, d) + E_{rx}(k) \quad (1.1)$$

où  $E_{tx}(k, d)$  et  $E_{rx}(k)$  représentent, respectivement, la consommation d'énergie de l'émetteur et du récepteur d'un message de  $k$  bits. Ce modèle simplifié est illustré dans la Figure 1.7 pour la paire émetteur-récepteur. En conséquence, la consommation d'énergie de l'émetteur est divisée en l'électronique d'émission et l'amplificateur de l'émetteur, tandis que la consommation d'énergie du récepteur dépend uniquement de l'électronique du récepteur. De plus, les consommations d'énergie de l'émetteur et du récepteur sont données par :

$$E_{tx}(k, d) = E_{tx-elec} * k + E_{amp} * k * d^n \quad (1.2)$$

$$E_{rx}(k) = E_{rx-elec} * k \quad (1.3)$$

où  $E_{tx-elec}$  et  $E_{rx-elec}$  représentent la consommation d'énergie par bit pour les circuits de l'émetteur et du récepteur. Tandis que,  $E_{amp}$  est la consommation d'énergie par bit de l'amplificateur de puissance.

## 1.5 LOCALISATION ET POSITIONNEMENT DES CAPTEURS

Le déploiement des RCSFs peut être aléatoire, ce qui nécessite la mise en oeuvre des techniques de localisation des différents capteurs formant le RCSF. La position ou la localisation de chaque capteur est calculée par les capteurs eux-mêmes afin de pouvoir situer les événements observés pour l'utilisateur final et acheminer l'information vers la station de base de manière efficace. Un nœud capteur peut être situé par deux techniques :

- **Positionnement** : avec cette technique, les coordonnées géographiques des nœuds sont connues.
- **Localisation** : cette technique permet de déduire les coordonnées de certains nœuds à partir de leurs distances par rapport à des nœuds particuliers dont les coordonnées géographiques sont déjà connues.

### 1.5.1 Positionnement des capteurs

Pour connaître le positionnement, on utilise généralement le GPS (Global Positioning System). Cependant, l'utilisation du GPS est coûteuse sur le plan énergétique, surtout dans un RCSF mobile exigeant une utilisation très fréquente du GPS. Par contre, si les capteurs sont fixes, le GPS peut être envisagé parce qu'il n'est utilisé qu'une seule fois pour le positionnement des capteurs. L'utilisation du GPS peut être optimisée en équipant uniquement quelques capteurs par un module GPS pour leur permettre de se positionner. Ces capteurs équipés de module GPS transmettent ensuite, leurs positions géographiques aux nœuds voisins (non équipés de GPS) afin qu'ils puissent calculer leurs positions en les prenant comme repère. Une autre solution consiste à déployer un seul nœud mobile équipé du

système GPS. Ce nœud va parcourir toute la zone d'intérêt tout en transmettant à chaque fois ses positions géographiques à son voisinage pour permettre aux autres nœuds de calculer leurs positions [Makhoul \[2008\]](#).

### 1.5.2 Localisation des capteurs

La localisation est le processus permettant à chaque nœud capteur d'estimer sa position par rapport à un repère. Ce processus, nécessite généralement le déploiement d'un certain nombre de nœuds configurés avec leurs coordonnées géographiques (ancres) soit manuellement, soit de manière dynamique en les équipant du système GPS pour permettre aux autres nœuds de connaître leurs positions. Pour ce faire, la plupart des algorithmes de localisation dans les réseaux de capteurs utilisent deux étapes [Makhoul \[2008\]](#) :

- **Estimation des distances inter-nœuds** : différentes techniques sont utilisées pour estimer la distance entre deux nœuds.
- **Dérivation des positions** : dans cette étape, les algorithmes de localisation utilisent les estimations inter-nœuds déjà calculées dans la première étape et les positions des nœuds déjà connues (ancres) pour dériver les positions des autres nœuds et construire la carte des positions comme illustré dans la Figure 1.8.

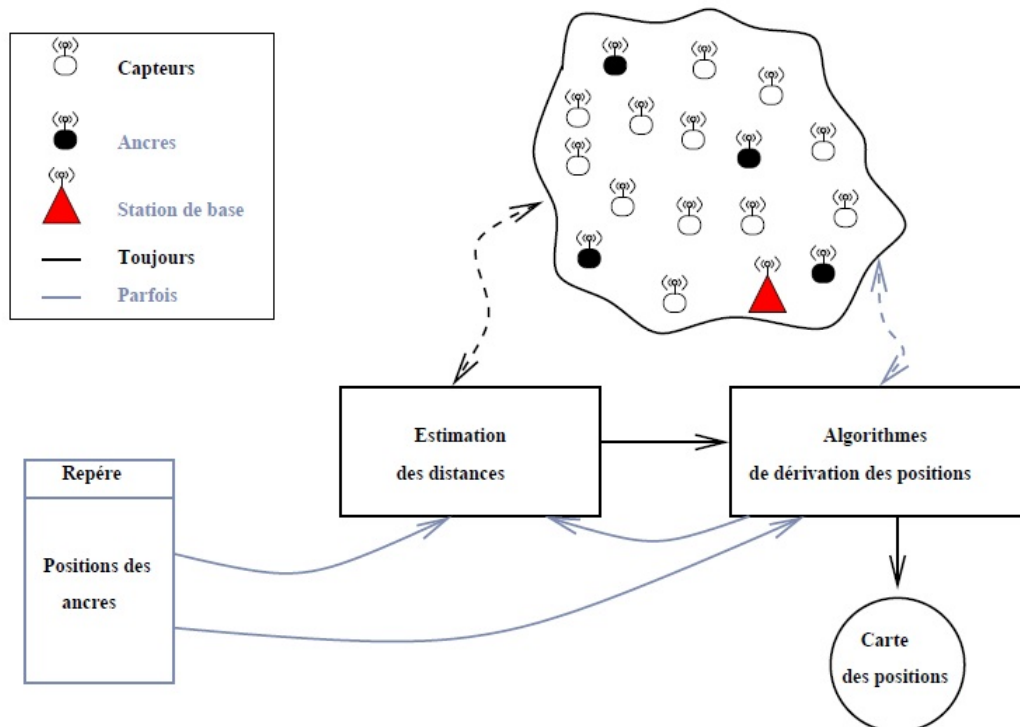


FIGURE 1.8 – Processus de localisation dans un réseau de capteurs sans fil [Makhoul \[2008\]](#).

### 1.5.3 Techniques d'estimation des distances

Cette section est dédiée à la description des différentes techniques d'estimation des distances entre les capteurs sur la base de l'heure d'arrivée,

la différence du temps d'arrivée, l'angle d'arrivée et la force du signal [Boushaba, 2007].

### 1.5.3.1 Heure d'arrivée (Time of Arrival ou TOA)

Si les horloges des deux nœuds capteurs, émetteur et récepteur sont synchronisés, et si on connaît le temps d'arrivée du signal  $t$  et sa vitesse de propagation  $c$ , la distance  $d$  entre les deux nœuds peut être calculée avec la formule  $d = c.t$ . La mise en œuvre de la technique dépend de la mesure du temps d'arrivée (TOA). Ce temps d'arrivée peut être mesuré à l'aide de certaines techniques de chronométrage avancées. Le système de positionnement global (GPS) utilise cette technique pour l'estimation de la distance. La TOA permet un haut niveau de précision, mais exige des capacités de traitement relativement rapides dans les nœuds capteurs [Wellenhoff et al., 1997].

### 1.5.3.2 Différence du Temps d'arrivée (Time Difference of Arrival ou TDOA)

Dans cette technique, l'émetteur envoie deux signaux différents, avec vitesse de propagation différente (on utilise généralement, les ultrasons et les signaux radio). Ces deux signaux vont être reçus par le récepteur à des instants différents et par conséquent la distance  $d$  sera estimée comme suit :

$$d = (V_{radio} - V_{ultrason}) * (t_{ultrason} - t_{radio} - t_{delai})$$

tel que :

- $V_{radio}, V_{ultrason}$  : Les vitesses de propagation des deux signaux,
- $t_{ultrason}, t_{radio}$  : Les temps d'arrivée des deux signaux,
- $t_{delai}$  : délai d'attente entre l'émission des deux signaux.

La technique TDOA est utilisée dans les projets suivants Active Bat [Ward et al., 1997], AHLoS [Savvides et al., 2001], Cricket [Priyantha et al., 2000].

### 1.5.3.3 Angle d'arrivée (Angle of Arrival ou AOA)

Cette technique utilise l'angle sous lequel le récepteur reçoit les signaux de l'émetteur ou l'angle d'arrivée (AoA) pour calculer la distance. L'angle d'arrivée peut être défini comme l'angle entre le signal reçu d'une onde incidente et une direction de référence. La direction de référence est appelée orientation, qui est une direction fixe et par rapport à laquelle la mesure d'AoA est effectuée. La mise en œuvre du système AoA repose sur des antennes intelligentes pour mesurer l'angle d'arrivée du signal. Une antenne intelligente est un réseau d'éléments d'antenne connectés à un processeur de signaux numériques. Cette technique d'AoA présente toutefois deux inconvénients majeurs qui les rendent difficilement applicable aux réseaux de capteurs. Premièrement, le coût élevé du réseau d'antennes. Ensuite, les techniques AoA ne sont pas adaptées aux systèmes comportant un grand nombre de nœuds.

### 1.5.3.4 Force du signal (Received Signal Strength Indicator ou RSSI)

Le signal radio s'atténue au fur et à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, ce qui est une propriété fondamentale de la propagation radio. La puissance du signal radio reçu diminue de façon exponentielle avec la l'augmentation de la distance, et cette atténuation peut être mesuré par le récepteur grâce à l'indicateur de la puissance du signal reçu (RSSI) afin d'estimer la distance le séparant de l'émetteur. Cette perte de puissance est calculée puis transformé en estimation de distance.

### 1.5.4 Dérivation des positions

Au cours de cette section, nous allons présenter les techniques classiques pour estimer les position des nœuds en se basant sur la distance qui sépare ces nœuds des ancrs. Notons, que les ancrs sont des nœuds dont les coordonnées géographiques sont connues [Langendoen and Reijers, 2003, Makhoul, 2008].

#### 1.5.4.1 Trilatération

La trilatération est fondée sur le même principe qu'un système GPS. Pour estimer la position d'un nœud capteur, elle utilise ses distances avec trois capteurs d'ancrage qui doivent être ses voisins à un saut. Aussi, les distances entre le nœud et les ancrs sont connues. La position du nœud est alors estimée en calculant l'intersection des trois cercles. Dans la Figure 1.10,  $S(x, y)$  est le nœud qui cherche à estimer sa position,  $A_1(x_1, y_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2)$ ,  $A_3(x_3, y_3)$  sont des ancrs et  $d_1, d_2, d_3$  sont les distances qui les séparent de  $S$ . La position du nœud capteur  $S$  est la solution du système d'équations suivant :

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{cases}$$

FIGURE 1.9 – Système d'équations de la technique de trilatération.

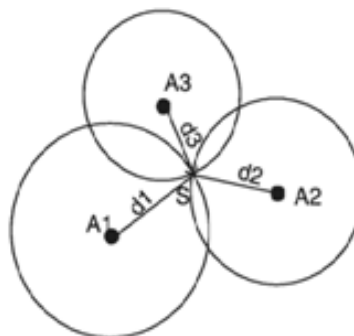


FIGURE 1.10 – Principe de la trilatération [Boushaba, 2007].

### 1.5.4.2 Multilatération

La multilatération est une généralisation de la trilatération. Elle consiste à utiliser plus de trois capteurs de référence (ancres) pour estimer la position inconnue d'un capteur. Cette position peut être calculée en connaissant les distances estimées entre le capteur et les différentes ancres comme le montre la Figure 1.11. Cette technique permet de réduire la marge d'erreur car plus de trois ancres vont participer à une multilatération.

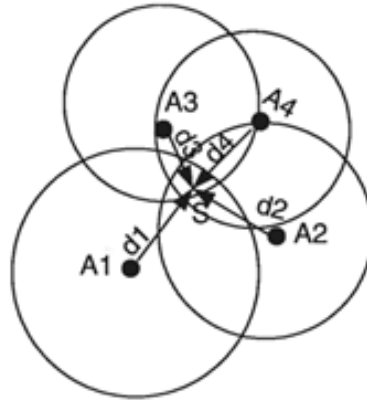


FIGURE 1.11 – Principe de la multilatération [Boushaba, 2007].

L'estimation de la position du nœud  $S$  de la Figure 1.11 au moyen de la multilatération résulte de la résolution de l'équation suivante :

$$(x - x_{A_i})^2 + (y - y_{A_i})^2 = d_i^2$$

tel que  $(x_{A_i}, y_{A_i})$  sont les coordonnées des ancres  $A_i$  quelque soit  $i = 1..n$  (avec  $n > 3$ ) tandis que  $(x, y)$  sont les coordonnées du nœud  $S$  à déterminer.

### 1.5.4.3 Triangulation

La triangulation est une technique géométrique qui utilise les angles d'arrivée pour déterminer les positions des capteurs. Elle est utilisée lorsque l'angle d'arrivée entre deux nœuds peut être mesuré. Donc, grâce à la technique AOA décrite dans une section précédente, nous pouvons utiliser la triangulation dans laquelle un nœud  $N$  connaît son angle  $\beta$  par rapport à deux nœuds d'ancrage  $NA_1$  et  $NA_2$  comme le montre la Figure 1.12, tandis que les deux nœuds d'ancrage connaissent les angles  $\alpha$  et  $\gamma$ . De plus, la distance entre les deux nœuds d'ancrage  $NA_1$  et  $NA_2$  est également connue [Tanvir, 2010].



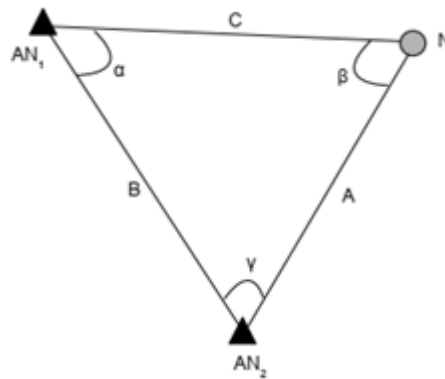


FIGURE 1.12 – Principe de la triangularisation [Tanvir, 2010].

Le nœud  $N$  peut alors estimer sa position en utilisant les règles de la trigonométrie :

$$\frac{A}{\sin \alpha} = \frac{B}{\sin \beta} = \frac{C}{\sin \gamma}$$

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \gamma$$

$$B^2 = A^2 + C^2 - 2AC \cos \beta$$

$$A^2 = B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha$$

## 1.6 DOMAINES D'APPLICATION DES RÉSEaux DE CAPTEURS

La souplesse des caractéristiques matérielles ainsi que logicielles des RCSFs leurs ont permis d'être exploités dans un large éventail de domaines d'application. Nous citons dans cette section, quelques applications potentielles dans certains domaines.

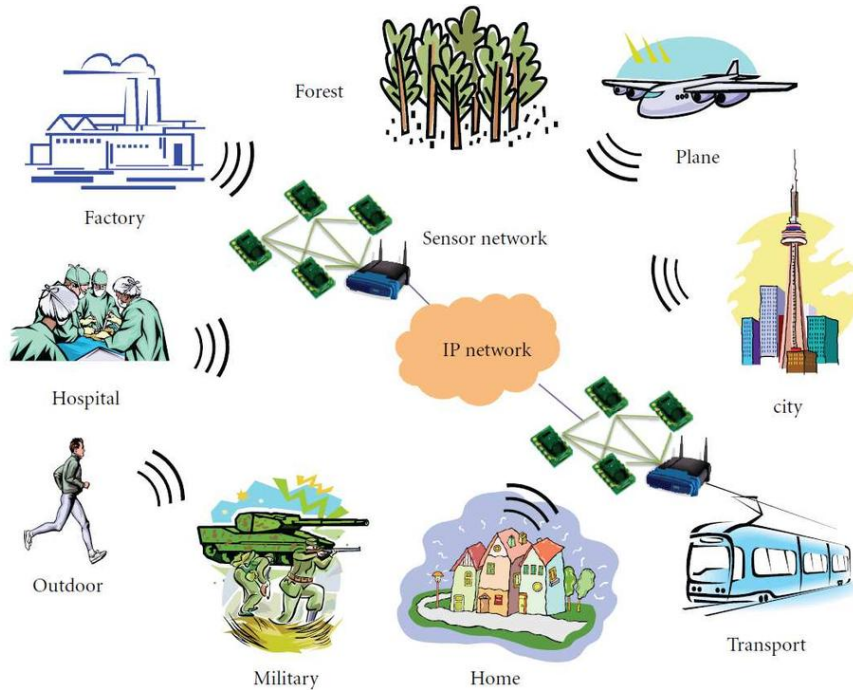


FIGURE 1.13 – Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil [Younes \[2012\]](#).

### 1.6.1 Domaine militaire

Comme c'est le cas de beaucoup de technologies, le domaine militaire a été la locomotive principale du développement des réseaux de capteurs. Les caractéristiques de déploiement rapide, d'auto-organisation et de tolérance aux pannes des réseaux de capteurs en font un outil appréciable dans le domaine militaire. Ils peuvent être déployés dans des endroits stratégiques et hostiles pour être utilisés dans la surveillance des champs de bataille, la reconnaissance des forces amies et ennemies, l'évaluation des dommages de combat, et surtout la détection et la reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques. Actuellement, les réseaux de capteurs font partie intégrante de tout système militaire à savoir des systèmes de commandement, de communications, de surveillance, de reconnaissance et de localisation. [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Petriu et al. \[2001\]](#), [Karl et al. \[2004\]](#).



FIGURE 1.14 – Analyse d’une zone stratégique avant le déploiement des troupes : domaine militaire [Benabbassi \[2014\]](#).

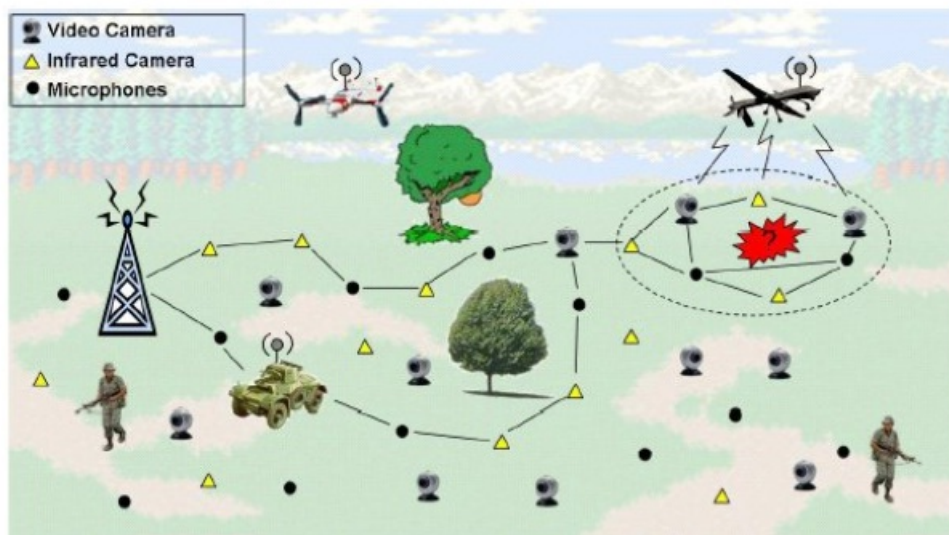


FIGURE 1.15 – Surveillance des champs de bataille : domaine militaire.

### 1.6.2 Domaine environnemental

Il existe une grande variété d’application dans le domaine environnemental. Ces applications ont pour rôle principale de mesurer, surveiller, détecter les paramètres environnementaux (température, pression atmosphérique, pollution etc.) pour bien les contrôler ou intervenir si nécessaire dans les meilleurs délais. A titre d’exemple, Ils sont utilisés pour mesurer le niveau de pollution des usines, surveiller les paramètres environnementaux qui affectent les cultures, le bétail, l’irrigation, détecter les feux de forêts, les tempêtes, les inondations, les fumées de produits toxiques dans les sites industriels tels que les centrales nucléaires ou pétrolières [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

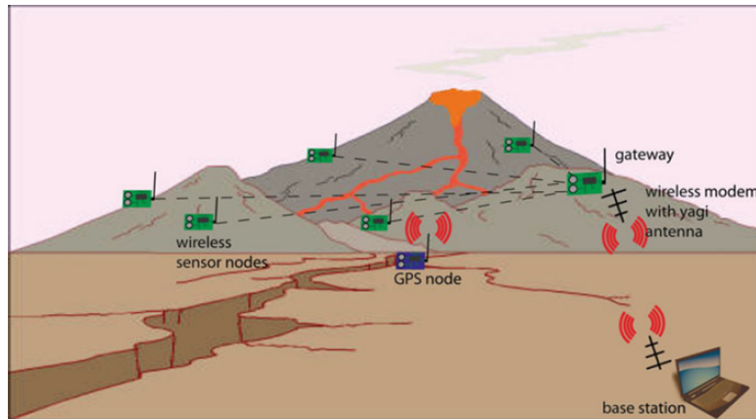


FIGURE 1.16 – Surveillance de l'activité volcanique : domaine environnemental *Selmic et al. [2016]*.

### 1.6.3 Domaine commercial

Dans le domaine de la grande distribution, les réseaux de capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison. Les capteurs peuvent être déployés, pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Des entreprises manufacturières, à l'aide des réseaux de capteurs, pourraient suivre le procédé de production depuis la matière première jusqu'au produit final livré *Messai [2019]*.

### 1.6.4 Domaine industriel

Dans l'industrie, les FCSFs peuvent être utilisés pour surveiller les processus de fabrication ou l'état des équipements de fabrication. Par exemple, des capteurs sans fil peuvent être installés sur les chaînes de production et d'assemblage pour surveiller et contrôler les processus de production. Les usines chimiques ou les raffineries de pétrole peuvent utiliser des capteurs pour surveiller l'état de leurs kilomètres de pipelines. De minuscules capteurs peuvent être intégrés dans des machines qui sont inaccessibles à l'homme afin de surveiller leurs état et de signaler toute défaillance *Zheng and Jamalipour [2009]*.

### 1.6.5 Domaine médical

L'architecture des réseaux de capteurs s'adapte bien au développement d'application dans le domaine médicale. En effet, Le RCSF permet d'apporter une assistance aux personnes handicapées, de collecter des données physiologiques humaines et aussi de faciliter le diagnostic de certaines maladies. De plus, ils peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui peuvent être avalés ou implantés sous la peau du patient (surveillance de la glycémie, tension artérielle etc.) *Akyildiz and Vuran [2010]*, *Dishongh and McGrath [2009]*, *Julien-Vergonjanne et al. [2016]*.

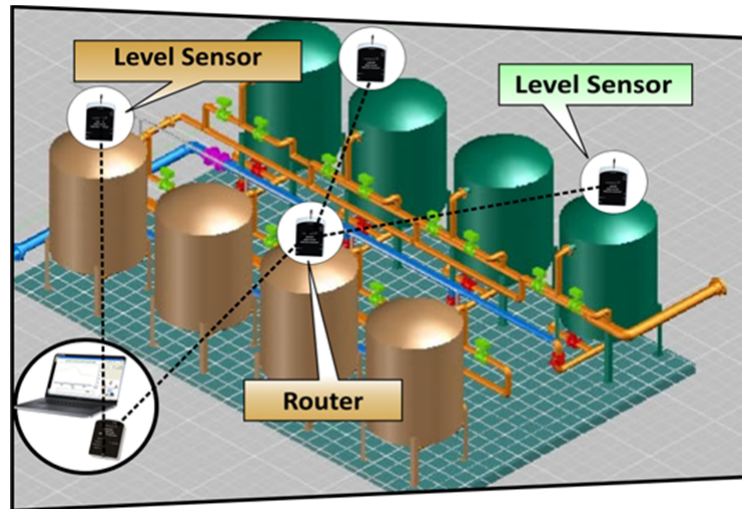


FIGURE 1.17 – Surveillance et contrôle d'une raffinerie de pétrole : domaine industriel.

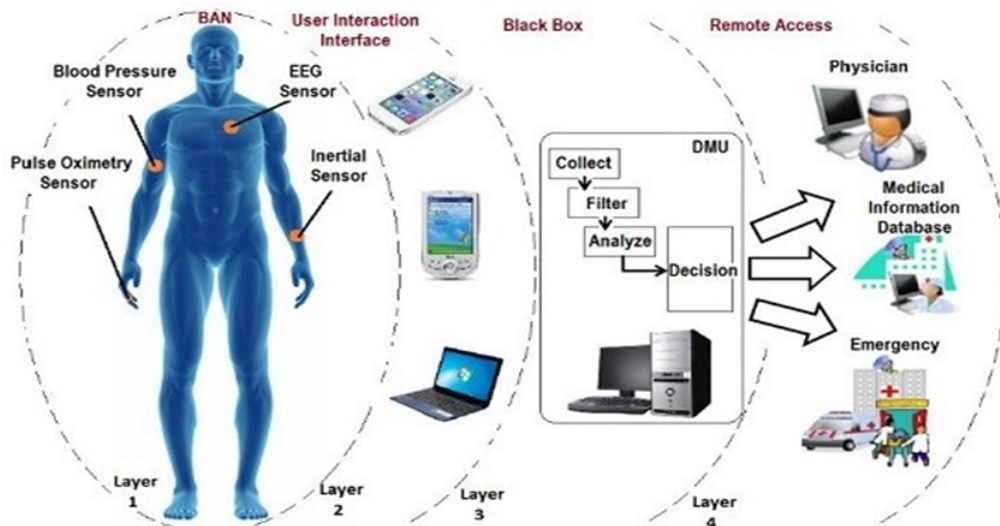


FIGURE 1.18 – Surveillance à distance des patients avec maladies chroniques : domaine médical.

### 1.6.6 Domaine domotique

Des nœuds capteurs intelligents peuvent être dissimulés dans des appareils électroniques tels que des aspirateurs, des fours à micro-ondes, des réfrigérateurs et des cuisinières. Ces nœuds capteurs à l'intérieur des appareils domestiques peuvent interagir entre eux et avec le réseau externe via Internet. Ils permettent aux utilisateurs finaux de gérer plus facilement les appareils domestiques, à la fois localement et à distance. En conséquence, les RCSF permettent l'interconnexion de divers dispositifs dans une maison avec un contrôle à distance [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Petriu et al. \[2001\]](#).

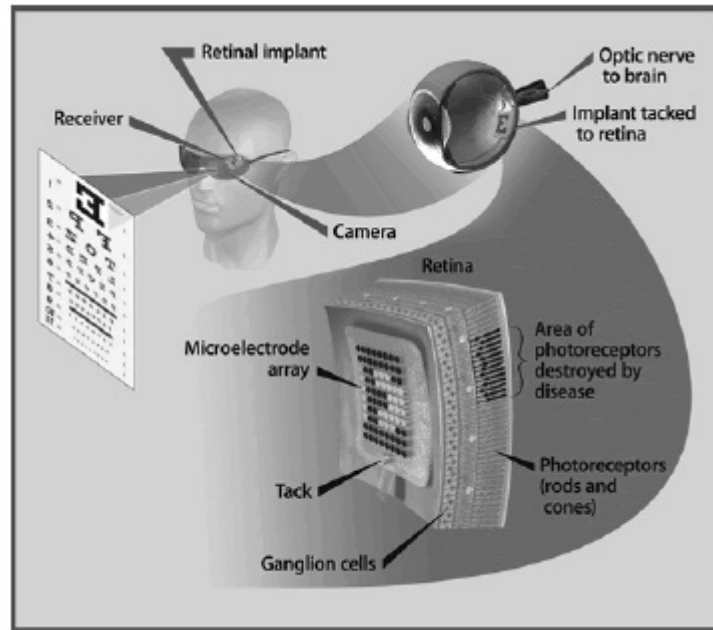


FIGURE 1.19 – Implantation d’une rétine artificielle pour un patient non voyant : domaine médical *Akyildiz and Vuran [2010]*.

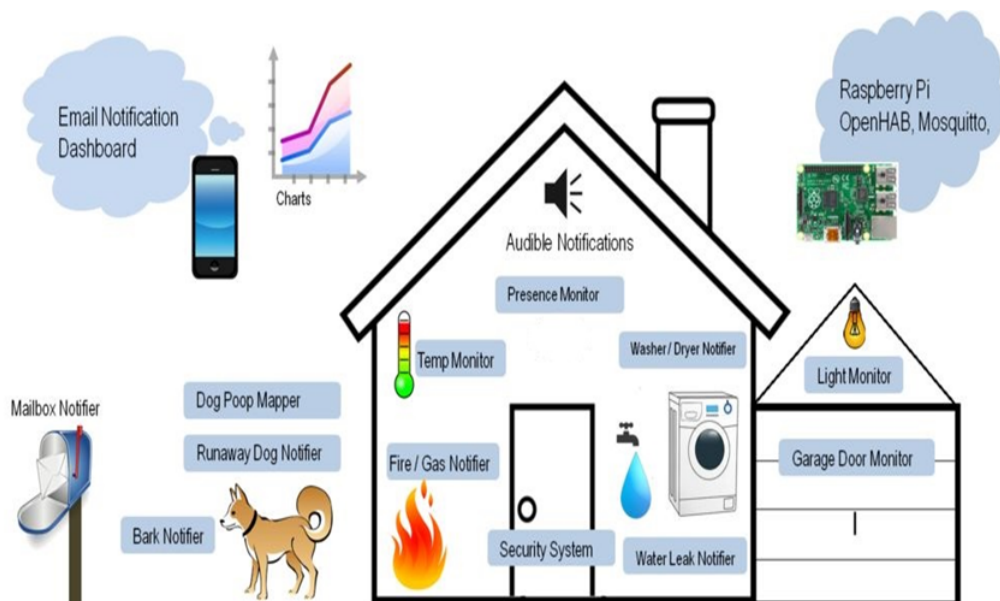


FIGURE 1.20 – Contrôle des maisons intelligentes : domaine domotique.

## 1.7 CONCLUSION

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu une révolution scientifique depuis leur apparition jusqu’à ce jour. D’ailleurs, ils constituent une technologie innovante suscitant un intérêt considérable puisqu’ils se sont imposés dans un large éventail de domaines d’application. Toutefois, de nombreux problèmes devraient être résolus afin de pouvoir utiliser les RCSFs dans les conditions les plus optimales possibles. La consomma-

tion d'énergie lors de la transmission des données, est l'un des problèmes principaux rencontrés dans ce genre de réseau. De ce fait, la plupart des protocoles de routage se sont intéressés, en premier lieu, à la gestion efficace de l'énergie au niveau des capteurs et à la prolongation de la durée de vie des réseaux. Nous allons présenter à travers le chapitre suivant les différentes classes de protocoles de routage dont l'objectif ultime est l'acheminement des données tout en préservant l'énergie consommée lors des transmissions.

# TAXONOMIE DU ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

# 2

## SOMMAIRE

---

2.1	INTRODUCTION . . . . .	29
2.2	ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	30
2.2.1	Applications temps réel . . . . .	31
2.2.2	Applications non-temps réel . . . . .	31
2.3	SPÉCIFICITÉS DU ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	31
2.4	PROBLÉMATIQUE DE CONCEPTION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	32
2.4.1	Déploiement des capteurs . . . . .	32
2.4.2	Énergie . . . . .	32
2.4.3	Livraison des données . . . . .	32
2.4.4	Capteurs hétérogènes . . . . .	33
2.4.5	Tolérance aux pannes . . . . .	33
2.4.6	Évolutivité . . . . .	33
2.5	TAXONOMIE DU ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	33
2.5.1	Selon la structure du réseau . . . . .	34
2.5.2	Selon les opérations du protocole . . . . .	36
2.5.3	Selon les paradigmes de communication . . . . .	38
2.5.4	Selon l'établissement de la route . . . . .	38
2.6	PRINCIPAUX PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs . . . . .	39
2.6.1	Routage Plat . . . . .	39
2.6.2	Routage Hiérarchique . . . . .	44
2.6.3	Routage Géographique . . . . .	50
2.6.4	Routage basé sur la Qualité de Service . . . . .	53
2.6.5	Synthèse des principaux protocoles de routage . . . . .	55
2.7	CONCLUSION . . . . .	59

---

## 2.1 INTRODUCTION

Le routage est l'une des fonctions les plus fondamentales dans un réseau de manière générale et dans un RCSF en particulier. Il permet aux différents noeuds du RCSF d'assurer l'acheminement des données capturées entre des sources et des destinations. La propagation des données



d'une source vers une destination se fait à travers plusieurs noeuds intermédiaires. Durant une telle transmission de données, un noeud consomme de l'énergie soit pour transmettre ses propres données, soit pour acheminer des données à d'autres noeuds. Par conséquent, un algorithme de routage doit tenir en compte la problématique de gestion de l'énergie des noeuds afin d'assurer une consommation énergétique réduite de ces derniers, et donc de garantir une prolongation de la durée de vie du RCSF.

De plus, un protocole de routage adapté aux RCSFs doit impérativement prendre en considération toutes les caractéristiques des capteurs (en termes de limitations des ressources énergétiques, contraintes matérielles etc.) pour atteindre les meilleures performances du réseau et répondre aux exigences des applications.

Lors des deux dernières décennies, un intérêt particulier a été accordé au développement de stratégies efficaces pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans la plupart de ces stratégies, les algorithmes de routage utilisés peuvent être classifiés selon la structure du réseau, les opérations du protocole, les paradigmes de communication et l'établissement des routes entre les sources et les destinations.

Ce chapitre est dédié au routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous l'entamons en précisant la relation intrinsèque qui existe entre les exigences des applications des RCSFs et les objectifs que doit atteindre les protocoles de routage. Nous présentons ensuite les caractéristiques à prendre en considération lors de la conception des protocoles de routage. Nous enchaînons avec une taxonomie détaillée des protocoles existants dans la littérature, classés selon les critères cités-ci-dessus. Nous concluons ce chapitre par une étude approfondie des protocoles qui sont parmi les plus utilisés dans les RCSFs suivie d'une synthèse des caractéristiques, des avantages ainsi que les inconvénients majeurs de ces derniers.

## 2.2 ROUTAGE DANS LES RCSFs

Le routage est défini comme étant le processus permettant d'acheminer un message d'une source vers une destination en utilisant un chemin de coût optimal. Les coûts à optimiser dans le routage sont très variés. De ce fait, plusieurs protocoles de routages différents ont été développés. Dans les réseaux classiques, il s'agit généralement du plus court chemin ou bien du chemin qui a la meilleure bande passante, parce que l'objectif dans ces réseaux est de partager les ressources entre le maximum d'utilisateurs tout en minimisant les délais de transmission, mais dans les réseaux de capteurs, l'objectif principal est la préservation d'énergie des nœuds pour maximiser la durée de vie du réseau et parfois un compromis entre cette préservation d'énergie et les exigences de l'application mise en oeuvre. Dans ce contexte, les applications peuvent être divisées en deux catégories [Gherbi et al. \[2017\]](#) :

### 2.2.1 Applications temps réel

Ces applications exigent que le message soit remis dans un délai bien déterminé sinon, le message devient obsolète et inexploitable. L'objectif principal des protocoles de routage développés pour cette catégorie d'application est de minimiser le temps de transmission pour qu'il soit toujours inférieur ou égal à un certain seuil, tout en préservant l'énergie des nœuds.

### 2.2.2 Applications non-temps réel

Ces applications n'ont pas de contrainte de temps et par conséquent le seul objectif est de maximiser la durée de vie du réseau pour exploiter l'application le plus longtemps possible. Les protocoles de routage dans ce cas, doivent équilibrer la charge entre tous les capteurs du réseau afin de préserver l'énergie dans chaque nœud et assurer une bonne couverture de la zone de surveillance.

Nous déduisons que la préservation d'énergie doit être toujours présente dans toute solution de routage dans les réseaux de capteurs quel que soit le type d'application mise en œuvre.

## 2.3 SPÉCIFICITÉS DU ROUTAGE DANS LES RCSFs

Le routage dans les RCSF est une tâche non triviale à cause des restrictions d'énergie et du changement brusque de topologie (défaillance des nœuds par exemple) ainsi que d'autres spécificités intrinsèques à ce type de réseaux. Il diffère du routage dans les réseaux MANET (Mobile Ad-hoc Networks) et réseaux cellulaires par les points suivants [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#) :

1. C'est un routage sans plan d'adressage. Les nœuds capteurs n'ont pas d'adresses IP,
2. La plupart des applications des RCSFs exigent toujours un routage de plusieurs sources vers une destination particulière (station de base)
3. Dans les RCSF, le routage est spécifique à l'application. En effet, chaque application nécessite ses propres types de capteurs et par conséquent son propre RCSF,
4. Les capteurs ont des ressources limitées en termes de traitement, de stockage et d'énergie. Le routage doit tenir compte de ces limitations.
5. La position géographique des nœuds capteurs est importante. Les capteurs doivent captés l'information à des endroits bien définis,
6. L'information est souvent redondante parce que plusieurs capteurs peuvent capter la même information.

À cause de toutes ces disparités, Il est nécessaire de développer des protocoles, utilisant de nouveaux mécanismes qui tiennent compte des caractéristiques inhérentes aux RCSFs, surtout la minimisation de la consommation d'énergie ainsi que les exigences des applications. Ces protocoles utilisent généralement, des techniques telles que l'agrégation des

données, la mise en cluster, l'attribution de rôles de nœuds différents et d'autres méthodes centrées sur les données [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

## 2.4 PROBLÈMATIQUE DE CONCEPTION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs

Pour concevoir un protocole de routage efficace, il faut trouver des solutions aux problèmes induits par les caractéristiques suivantes spécifiques aux réseaux de capteurs :

### 2.4.1 Déploiement des capteurs

Comme c'est déjà expliqué dans le chapitre précédent, le déploiement des nœuds peut être déterministe ou aléatoire selon l'application mise en oeuvre. Dans le cas déterministe, le routage consiste en des chemins prédéterminés. Dans le cas aléatoire, la topologie résultante est une topologie ad-hoc où la dispersion des nœuds n'est pas forcément uniforme. Par conséquent, la mise en cluster est nécessaire pour un routage optimal assurant la préservation d'énergie avec une bonne connectivité [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

### 2.4.2 Énergie

La durée de vie du réseau RCSF et celle des batteries sont très dépendantes. Comme chaque nœud joue deux rôles, source de données et routeur de données, la défaillance de certains capteurs à cause de l'épuisement des batteries, engendre des changements significatifs sur la topologie, ce qui nécessite une réorganisation du réseau avec d'autres chemins de routage [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

### 2.4.3 Livraison des données

La livraison des données dans les réseaux de capteurs dépend de l'application. Elle peut être :

- **Continue (Time driven)** : Les données sont transmises de manière continue. Les capteurs réveillent leurs unités de capture et émetteurs de manière périodique pour envoyer les données à des intervalles de temps constants vers la station de base. Elle convient aux applications de surveillance permanente d'un phénomène.
- **Évènementielle (Event-driven)** : Les données sont transmises si et seulement s'il y a un évènement qui se produit sinon rien n'est envoyé. Elle convient aux applications qui surveillent l'arrivée d'un évènement bien précis.
- **À base de requêtes (Request-driven)** : Les données ne sont transmises par les capteurs que lorsqu'ils reçoivent des requêtes en provenance de la station de base.
- **Hybride** : Une combinaison des modèles précédents.

D'après ce qui est décrit précédemment, il est évident que le choix du modèle de livraison influe sur la conception des protocoles de routage sur

le plan de la consommation d'énergie et la stabilité des chemins [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

#### 2.4.4 Capteurs hétérogènes

L'existence de capteurs hétérogènes dans un RCSF pose des contraintes supplémentaires aux protocoles de routage. En effet, il faut prendre en considération les spécificités de chaque capteur en termes de capacité pour bien exploiter cette hétérogénéité en donnant à chacun, un rôle approprié par rapport à ses ressources, pour préserver l'énergie et maximiser la durée de vie du réseau [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

#### 2.4.5 Tolérance aux pannes

Les capteurs dans un réseau RCSF peuvent tomber en panne à cause de l'épuisement de la batterie ou une défaillance physique. Les protocoles de routage doivent se préparer à une telle éventualité par une gestion énergétique efficace pour éviter l'épuisement précoce des batteries, et empêcher une situation d'un point unique de panne pour ne pas perdre de l'information suite à la défaillance d'un capteur. Ils doivent toujours trouver des chemins palliatifs pour acheminer les données à la station de base même dans les situations les plus difficiles [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

#### 2.4.6 Évolutivité

Certaines applications exigent le déploiement à haute densité de capteurs (des centaines ou des milliers). Par conséquent, il faut prévoir des protocoles de routage capables de gérer efficacement des grands nombres de capteurs. En effet, il faut profiter de cette densité afin d'économiser l'énergie en limitant l'échange d'informations locales et favorisant un routage avec agrégation pour éliminer la redondance [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

### 2.5 TAXONOMIE DU ROUTAGE DANS LES RCSFS

En général, les protocoles de routage peuvent être classés selon différents critères : la structure du réseau, les opérations du protocole, les paradigmes de communication et l'établissement de la route [Lindsey et al. \[2001\]](#).

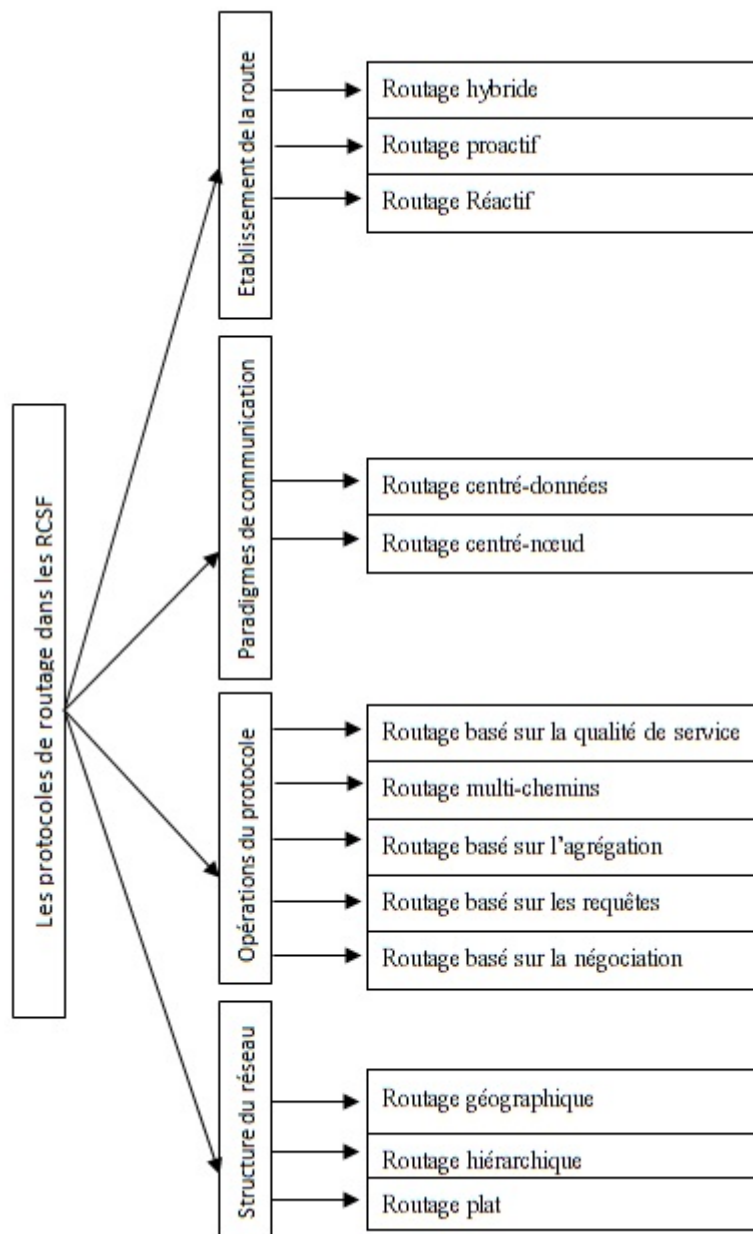


FIGURE 2.1 – Taxonomie des protocoles de routage dans les RCSFs Lindsey et al. [2001].

### 2.5.1 Selon la structure du réseau

Les protocoles de routage de cette catégorie créent une certaine structure dans le réseau pour définir la façon avec laquelle les nœuds coopèrent entre eux pour acheminer les données à la station de base. On trouve dans cette catégorie, trois classes de routage : plat, hiérarchique et géographique Al-Karaki and Kamal [2004], Lindsey et al. [2001].

#### 2.5.1.1 Routage plat

Dans ce type de routage, tous les nœuds jouent le même rôle et coopèrent entre eux pour acheminer les données à la station de base, à

travers un processus multi-sauts. C'est un routage simple, tolérant aux pannes, qui s'adapte mieux aux changements de topologie, avec un coût réduit pour maintenir la structure entre les nœuds communicants. Toutefois, plus on s'approche de la station de base, plus les nœuds participent davantage au routage, par conséquent, leurs batteries s'épuisent plus rapidement. La Figure 2.2 montre un réseau de capteurs sans fil utilisant un routage plat.

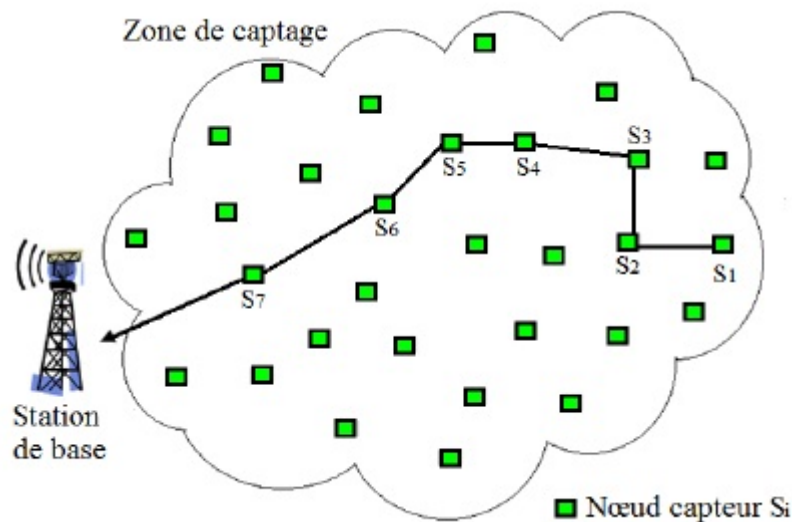


FIGURE 2.2 – Routage plat Ngom [2016].

### 2.5.1.2 Routage hiérarchique

Ce type de routage impose une certaine structure au réseau sous forme de clusters, comme illustré sur la Figure 2.3, dans laquelle les nœuds n'ont pas les mêmes rôles. Des nœuds ayant une énergie plus élevée appelés «Cluster Heads» prennent, en plus de la tâche de détection, la responsabilité de contrôler les communications à l'intérieur des clusters pour assurer le relais avec la station de base (appelée également sink ou puits), tandis que les autres nœuds, à faible énergie se contentent de faire la détection avec une communication locale. La mise en œuvre du routage hiérarchique nécessite généralement deux étapes : une étape pour définir les clusters et une autre étape pour faire le routage. L'objectif principal du routage hiérarchique est la préservation d'énergie à travers l'agrégation et la fusion des données par les CHs, afin de réduire la taille des données à envoyer et de favoriser la scalabilité et le déploiement à grande échelle.

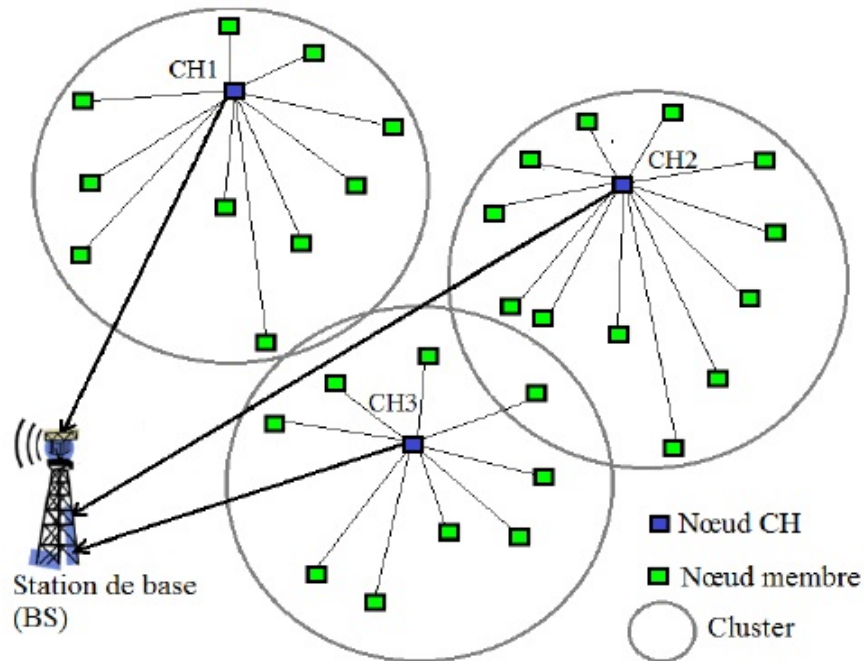


FIGURE 2.3 – Routage hiérarchique Ngom [2016].

### 2.5.1.3 Routage géographique

Les protocoles de routage géographiques (ou basés sur la localisation) utilisent les informations de localisation pour acheminer les données vers des régions ciblées plutôt que vers tout le réseau. En effet, chaque nœud doit connaître sa position géographique et la communiquer à ses voisins par échange de messages de contrôles. La position géographique peut être connue par un système GPS ou via des algorithmes de localisation. Connaissant ces informations, chaque nœud peut estimer la puissance du signal pour économiser l'énergie et calculer sa distance et celles de ses voisins à la destination et envoyer ensuite les données au nœud voisin qu'il le rapproche le plus de la cible.

## 2.5.2 Selon les opérations du protocole

Les protocoles de routages peuvent être répartis selon les opérations effectuées par le protocole pour acheminer les données en cinq classes : routage basé sur la négociation, routage basé sur les multi-chemins, routage basé sur les requêtes, routage basé sur la qualité de service et routage basé sur l'agrégation Al-Karaki and Kamal [2004], Lindsey et al. [2001].

### 2.5.2.1 Routage basé sur la négociation

L'objectif principal du routage basé sur la négociation est d'empêcher la transmission de données redondantes aux autres capteurs par la négociation. En effet, La diffusion de toutes les données sur le réseau engendre sûrement une implosion, où plusieurs nœuds recevront des copies en double de ces mêmes données. Envoyer des données redondantes par

différents capteurs consomme de manière inutile plus d'énergie et de traitement. Pour résoudre ce problème, avant toute transmission, il y a une négociation entre les nœuds capteurs à travers l'échange de descripteurs de données de haut niveau appelés métadonnées, pour vérifier si le nœud destinataire dispose déjà de la donnée. Dans le cas affirmatif le capteur s'abstient d'envoyer cette donnée. De cette manière, chaque nœud recevra une seule copie de chaque information et l'implosion sera évitée (SPIN, Directed diffusion, SAR, SPAN etc.).

### 2.5.2.2 Routage basé sur les requêtes

La station de base envoie des requêtes pour demander des données aux nœuds appartenant à tout ou une partie du réseau. Les nœuds ayant les données requises, doivent répondre en les envoyant à la station de base. Ces requêtes doivent être formulées soit par un schéma valeur-attribut soit par un langage de requête de haut niveau tel que SQL ou même en langage naturel (Directed Diffusion).

### 2.5.2.3 Routage basé sur l'agrégation

Les RCSFs sont généralement denses et plusieurs capteurs peuvent capter la même information. Comme déjà cité précédemment, l'énergie d'un capteur est surtout consommée lors de la transmission des données. Par conséquent, les protocoles de routage utilisent la technique d'agrégation qui permet d'éliminer la redondance et réduire la taille des informations à transmettre à travers des fonctions d'agrégats telles que MAX, MIN, MOYENNE, pour préserver l'énergie et optimiser l'utilisation de la bande passante et surtout éviter l'implosion.

### 2.5.2.4 Routage multi-chemins

Il s'agit de protocoles utilisant plusieurs chemins au lieu d'un seul pour acheminer l'information, afin d'améliorer les performances du réseau, renforcer la tolérance aux pannes et assurer une certaine qualité de service. Si des nœuds impliqués dans le chemin primaire tombent en panne, on trouvera toujours d'autres chemins alternatifs. La maintenance de ces chemins multiples nécessite un échange de messages de contrôle périodiques entre les nœuds au détriment d'une surconsommation d'énergie.

### 2.5.2.5 Routage basé sur la qualité de service

Le but de la qualité de service dans un réseau est de parvenir à un comportement plus déterministe afin que les informations véhiculées par le réseau puissent être mieux fournies et les ressources mieux utilisées. Cela se traduit dans un réseau RCSF par un protocole qui doit trouver un équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité du service fourni. Pour atteindre cet objectif, le routage doit satisfaire les contraintes imposées aux métriques de la qualité de service désirée (latence, énergie consommée, bande passante etc.) lors de l'acheminement des données vers la station de base.



### 2.5.3 Selon les paradigmes de communication

Chaque paradigme définit un modèle de communication. Il existe deux paradigmes : centré nœuds (Node centric) et centré données (Data centric) [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

#### 2.5.3.1 Centré-nœuds (Node-centric)

C'est un routage basé sur l'identification des capteurs (adresse IP par exemple). Dans ce cas, chaque capteur devrait être adressé individuellement pour obtenir de l'information. Ce paradigme utilisé dans les réseaux conventionnels n'est pas adapté aux réseaux RCSF parce qu'il ne reflète pas l'usage réel des réseaux de capteurs. Cependant, cette identification des nœuds est nécessaire pour des besoins fonctionnels de certains protocoles de routage.

#### 2.5.3.2 Centré-données (Data-centric)

Puisque le routage centré-nœuds ne convient pas aux réseaux RCSFs, un routage centré-données (Data-centric) a été proposé. Dans ce type de routage, la station de base envoie des requêtes à certaines régions du réseau et attend les données des capteurs situés dans ces régions ciblées, sans identifier les nœuds qui seront à l'origine de ces données. Par exemple, on utilise la requête «les zones où la température est supérieure à 45° » au lieu de la requête « la température lue par un nœud spécifique». Puisque que les données envoyées sont demandées via des requêtes, la dénomination basée sur les attributs est nécessaire pour spécifier les propriétés que doit vérifier ces données. Il faut signaler aussi, que les données transmises par les capteurs d'une même région de déploiement sont souvent redondantes. Par conséquent l'agrégation des données durant le relayage doit être envisagée.

### 2.5.4 Selon l'établissement de la route

Les protocoles de routage peuvent être classés suivant le moment de l'établissement des routes pour acheminer des données, en trois catégories : les protocoles proactifs, réactifs et hybrides [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#), [Lindsey et al. \[2001\]](#).

#### 2.5.4.1 Protocoles proactifs

Dans ce type de protocole, tous les chemins vers toutes les destinations sont préétablis à l'avance et mis dans la table de routage de chaque nœud. La maintenance des tables et surtout la détection de tout changement de topologie nécessite un échange de messages de contrôle régulier entre les nœuds. Ce protocole est beaucoup plus adapté aux applications avec prélèvement périodique de données. Dans ce cas, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité pour économiser l'énergie.

#### 2.5.4.2 Protocoles réactifs

Ces protocoles établissent et maintiennent les routes d'acheminement des données à la demande. À chaque fois qu'un nœud a besoin d'acheminer les données vers une certaine destination, on commence à chercher une route vers cette destination. Cette route est maintenue jusqu'à ce que le nœud cesse de transmettre.

#### 2.5.4.3 Protocoles hybrides

Il s'agit de protocoles mixtes utilisant le principe des deux protocoles précédents. Chaque nœud utilise un protocole proactif pour préétablir des routes vers son voisinage proche. Au delà de ce voisinage, il utilise le protocole réactif pour la découverte des routes.

## 2.6 PRINCIPAUX PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCSFs

### 2.6.1 Routage Plat

#### 2.6.1.1 Flooding and Gossiping

Le Flooding et le Gossiping [Kulik et al. \[1999\]](#) sont les protocoles de routage les plus traditionnels (routage conventionnel). En utilisant le mécanisme du flooding, chaque capteur recevant un paquet de données, le stocke et le diffuse (broadcast) à tous ses voisins et ses voisins feront de même jusqu'à ce que le paquet arrive à destination. C'est un protocole réactif, simple à mettre en œuvre mais il présente trois inconvénients consommant inutilement de l'énergie :

- **L'implosion** : Puisque les paquets de données sont diffusés à tous les voisins, un nœud peut recevoir autant de copies du même paquet qu'il y a de voisins.
- **Le chevauchement** : Si plusieurs nœuds surveillent la même région géographique, ils peuvent capter la même information et par conséquent un nœud voisin peut recevoir cette même information plusieurs fois (redondance)
- **L'ignorance des ressources (Resource blindness)** : Le flooding ne tient pas compte des capacités des nœuds. Tous les nœuds sont utilisés de la même façon quelque soit le niveau de leurs ressources énergétiques.

Le gossiping est une amélioration de flooding où chaque capteur recevant un paquet de données, l'envoie à certains de ses voisins sélectionnés aléatoirement et ses voisins font de même jusqu'à atteindre la destination. Cette amélioration règle le problème d'implosion mais le chevauchement et l'ignorance des ressources persistent [Matin and Islam \[2012\]](#).

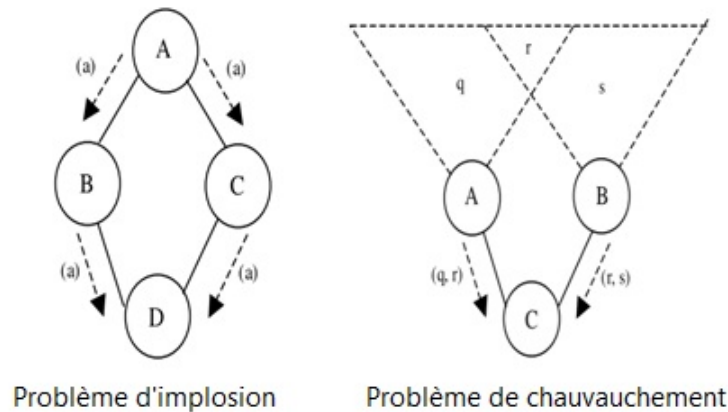


FIGURE 2.4 – (a) Problème d'implosion : Le nœud A inonde ses données vers tous ses voisins. Le nœud D reçoit deux copies de la même donnée.  
 (b) Problème de chevauchement : Deux capteurs couvrent des régions géographiques qui se chevauchent (A et B). Le nœud C obtient la même copie des données de ces capteurs *Matin and Islam [2012]*.

#### 2.6.1.2 Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)

SPIN [Kulik et al. \[2002\]](#) est une famille de protocoles proposés pour remédier aux inconvénients du flooding à savoir l'implosion, le chevauchement et l'ignorance des ressources. Ces protocoles centrés-données sont basés sur la négociation. L'idée derrière SPIN est d'utiliser des descripteurs de haut niveau ou méta-données pour décrire les données. Avant la transmission, les méta-données sont échangées entre les nœuds par un mécanisme de publicité de données (ADV). Seuls ceux qui n'ont pas encore reçu ces données (DATA), envoient une requête (REQ) à son voisin pour les récupérer. Chaque nœud recevant de nouvelles données, les annonce à son tour à ses voisins par le même mécanisme de publicité (ADV). Lorsque l'énergie d'un nœud descend sous un certain seuil, il ne répond à aucun message ADV. Le protocole SPIN permet d'atteindre des performances élevées à un faible coût d'énergie, de calcul et de communication. Chaque nœud n'a besoin de connaître que ses voisins à un saut. Il réduit considérablement la consommation d'énergie par rapport au flooding. Toutefois, le mécanisme de publicité de données (ADV) ne peut garantir leur livraison et si le nœud intéressé par les données est éloigné de la source, les données ne seront pas livrées. Il ne convient pas aux applications nécessitant une fiabilité dans la livraison des données.

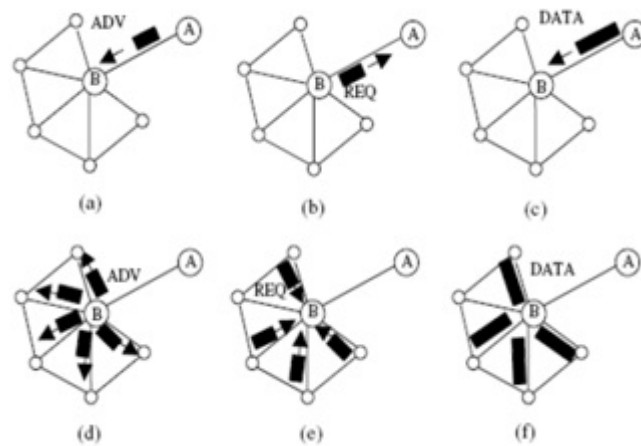
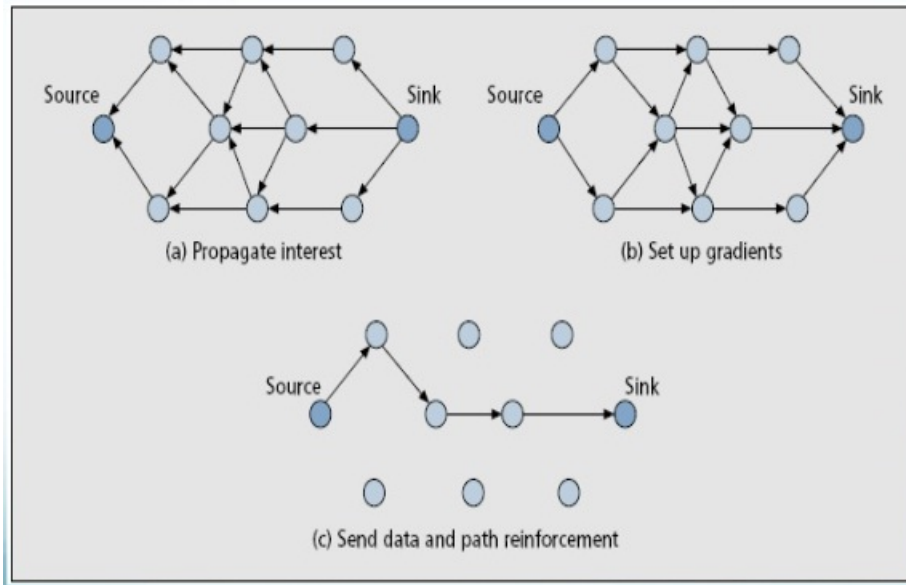


FIGURE 2.5 – Protocole SPIN : diffusion des annonces *Matin and Islam [2012]*.

### 2.6.1.3 Directed Diffusion

Directed Diffusion *Intanagonwiwat et al. [2000]* est un protocole de référence dans le routage data-centric. La station de base diffuse dans tout le réseau une requête d'intérêt définie par une liste de couples attribut-valeur, afin d'interroger les nœuds sur certain type de données. Cette liste se propage dans le réseau par inondation. Chaque nœud intermédiaire recevant un intérêt, le met dans un cache avec un gradient, puis le relaie vers ses voisins. Le gradient est un vecteur contenant le voisin émetteur de l'intérêt, le débit des données et la durée de validité de l'intérêt. Le gradient est utilisé pour garder trace du lien de réponse. La mise en cache des intérêts permet d'éviter les boucles en rejetant les intérêts déjà reçus. Dès que les sources cibles reçoivent l'intérêt, ils préparent les données pour les acheminer vers la station de base en utilisant l'information contenue dans les gradients des nœuds intermédiaires. De cette façon, plusieurs chemins peuvent être établis entre la station de base et la source. Après la réception des premières données, la station de base entame un processus de renforcement d'un chemin en augmentant le débit dans chacun de ses nœuds. C'est un protocole inapproprié pour les applications nécessitant une livraison continue de données, Le schéma de dénomination basé sur les couples attribut-valeurs dépend de l'application. Il doit être défini a priori pour chaque application *Challal [2008]*, *Intanagonwiwat et al. [2003]*.

FIGURE 2.6 – Protocole de diffusion directe [Challal \[2008\]](#).

#### 2.6.1.4 Rumor Routing (RR)

Rumor Routing [Braginsky and Estrin \[2002\]](#) est une variante du protocole directed diffusion. Il est utilisé pour les applications où le routage géographique n'est pas possible. Il combine l'inondation des requêtes et l'inondation d'événements de manière aléatoire. Dans RR, au lieu d'inonder le réseau de requêtes, chaque nœud source détectant un événement, l'ajoute à sa table locale, appelée table d'événements et crée un paquet de données avec une longue durée de vie moyennant un grand TTL appelé agent. Il l'injecte dans le réseau en l'envoyant à un voisin choisi aléatoirement, et ce voisin fera de même jusqu'à  $TTL = 0$ . Cet agent maintient une table d'événements similaires à celles se trouvant dans chaque nœud contenant l'événement et le chemin vers son nœud d'origine. L'agent informe chaque nœud dans son parcours de tous les événements qu'il a rencontrés, en synchronisant sa table en permanence avec chaque nœud visité. Les requêtes sont injectées dans le réseau de la même manière que les informations d'événements. Quand un nœud reçoit une requête, il vérifie dans sa table d'événements s'il a une trace de l'événement demandé. Si oui, on répond à la requête en retournant le chemin vers son nœud d'origine. Sinon, il renvoie la requête au voisin suivant, choisi aléatoirement. Le routage RR préserve de manière significative l'énergie par rapport aux inondations. Cependant, ce routage n'est applicable que lorsque le nombre d'événements est faible par rapport au nombre de requêtes. Si le nombre d'événements est important, la maintenance des agents devient très coûteuse en énergie.

#### 2.6.1.5 COUGAR

Le protocole COUGAR [Yao and Gehrke \[2002\]](#), qui considère le réseau comme une grande base de données distribuée et les données produites par chaque nœud, suite au captage comme une table relationnelle. Les

attributs dans cette table représentent soit des informations sur le nœud, soit des données captées. Pour que la station de base puisse manipuler les tables de cette base de données distribuée, le protocole Cougar ajoute une nouvelle couche entre la couche application et la couche réseau permettant d'utiliser des requêtes déclaratifs pour interroger le réseau. Nous signalons à la fin, que cette approche soutienne l'agrégation des données pour économiser l'énergie.

### 2.6.1.6 Discussion

Les protocoles de routage centrés-données utilisent une architecture plate avec un mécanisme d'établissement de chemins dépendant de l'application. Ce mécanisme détermine les deux points d'extrémité du chemin, ce qui permet une certaine dynamique. De plus, dans un protocole centré données, un plan d'adressage des nœuds n'est pas nécessaire. Cela permet une efficacité énergétique significative puisque les routes ne sont construites que lorsqu'il y a un intérêt et qu'il n'est pas nécessaire de maintenir une topologie globale du réseau. Les solutions centrées-données réduisent également la consommation d'énergie dans le réseau par la sélection de routes bien déterminées pour un intérêt spécifique à partir de la station de base. Par conséquent, seuls certains nœuds sont impliqués dans le routage d'information.

Un inconvénient majeur des protocoles de routage centrés-données est qu'ils sont généralement basés sur une topologie plate. Cela entraîne un problème de mise à l'échelle ainsi qu'une congestion accrue des nœuds les plus proches de la station de base. Des mécanismes d'agrégation distribués sont nécessaires pour diminuer le contenu de l'information circulant dans chaque partie du réseau. Les approches centrées-données donnent lieu à des schémas de dénomination dépendant de l'application. En conséquence, pour chaque changement d'application, ces schémas doivent être redéfinis.

Le grand avantage de SPIN est qu'il est tolérant au changement de topologie puisque chaque nœud capteur dissémine ses données de manière locale à travers ses voisins proches. De plus, le mécanisme de négociation lui permet d'éliminer la redondance et d'éviter l'implosion. Cependant, le flux de trafic dans SPIN qui est initié à partir des nœuds capteurs et se termine généralement à la station de base, n'est pas toujours préférable lorsque la station de base demande des informations spécifiques aux nœuds capteurs.

Le protocole Directed Diffusion a été développé pour répondre à cette exigence. Contrairement au protocole SPIN où c'est le nœud capteur qui annonce à ses voisins la disponibilité de nouvelles données, afin que ces derniers puissent les demander s'ils sont intéressés, le protocole Directed Diffusion utilise un mécanisme de requêtes initiées par la station de base et inondant tout le réseau pour chercher des données spécifiques. De ce fait, le protocole Directed Diffusion n'est donc pas un bon choix pour les applications dynamiques, qui exigent des données en continu. En outre,

les types de requêtes ainsi que leur mise en correspondance avec les données doivent être définis pour chaque application.

Le protocole Rumor Routing optimise bien la consommation d'énergie par apport à Directed Diffusion grâce à sa technique d'inondation d'événements. En effet, au lieu d'inonder des requêtes dans tout le réseau à partir de la station de base comme c'est le cas dans Directed Diffusion, Rumor Routing inonde des événements à partir des nœuds. Cependant, cette optimisation d'énergie est vraie jusqu'à un certain nombre d'événements. Dépassant ce nombre le coût nécessaire pour la maintenance des agents et les tables d'événements au niveau de chaque nœud devient non négligeable surtout si ces événements ne sont pas sollicités par des requêtes d'intérêts [Manjeshwar and Agrawal \[2001\]](#).

## 2.6.2 Routage Hiérarchique

### 2.6.2.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Le protocole LEACH [Heinzelman et al. \[2000\]](#) vise à minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs à travers la clustérisations [18]. Le but de LEACH est de sélectionner dynamiquement des nœuds capteurs en tant que Cluster-Head (CH) et de former des clusters dans le réseau. Les communications à l'intérieur des clusters sont dirigées uniquement vers le CH, qui effectue l'agrégation. Les CHs communiquent alors directement avec la station de base (puits) pour relayer les informations collectées de chaque cluster. LEACH attribue le rôle de CH dynamiquement à différents nœuds du réseau de sorte que la consommation d'énergie élevée lors de la communication avec la station de base soit partagée entre tous les nœuds du réseau de capteurs.

LEACH est conçu pour être exécuté sous forme de rounds, qui à leur tour se composent de deux phases. Pendant chaque round, chaque formation de cluster reste la même et les CHs sont sélectionnées au début de chaque round. Un round comprend deux phases : setup phase et steady state phase. Durant setup phase, les CHs sont sélectionnées, les clusters sont formés et l'ordonnancement de la communication à l'intérieur des clusters est déterminé. Durant steady state phase, la communication de données entre les membres d'un cluster et le CH est effectuée. La durée de la steady phase est plus longue que la durée de la setup phase afin de minimiser les coûts.

**Set-up phase** : Cette phase du protocole LEACH comprend trois phases : la diffusion, la formation des clusters et la définition de l'ordonnancement. LEACH vise à sélectionner au hasard des capteurs en tant que CHs au début de chaque round. La sélection du CH est effectuée à travers la phase de diffusion, où les CHs diffusent un message sur le réseau annonçant qu'ils sont des CHs. Cela se passe de la manière suivante [Heinzelman et al. \[2000\]](#) :

Chaque capteur choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si ce nombre aléatoire est inférieur à un seuil  $T(n)$ , le nœud capteur devient un CH. Le seuil  $T(n)$  est calculé comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

tel que :

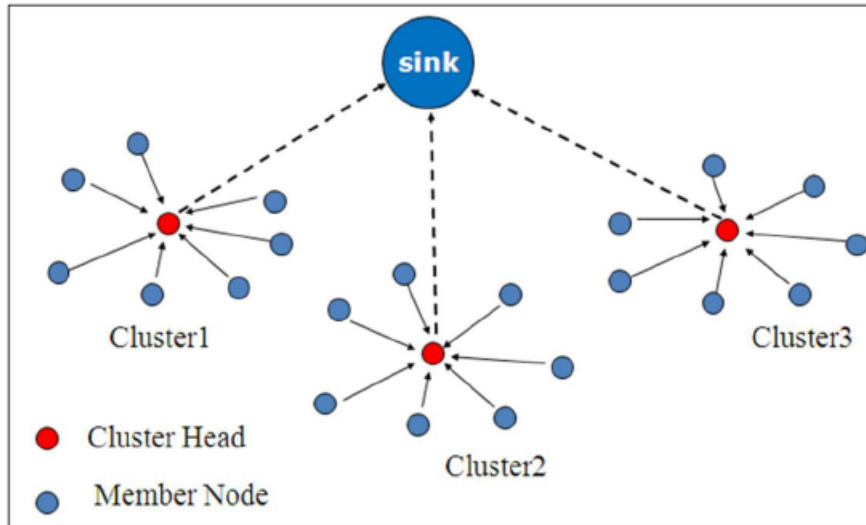
- $P$  est le pourcentage des CHs désiré.
- $r$  est le round actuel.
- $G$  est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été sélectionnés comme CH durant les  $1/P$  derniers rounds.

Les CHs sélectionnées annoncent ensuite à leurs voisins du réseau qu'ils sont des CHs. Pour faire cette opération, LEACH s'appuie sur un schéma d'accès aléatoire basé sur CSMA pour éviter les collisions entre messages provenant de plusieurs CHs. Une fois que les nœuds capteurs reçoivent ces messages, ils déterminent le cluster auquel ils vont appartenir. Si un nœud reçoit un message d'un seul CH, il devient automatiquement membre de ce cluster. Cependant, si un nœud capteur reçoit des messages provenant de plusieurs CHs, la sélection du cluster est effectuée sur la base de la puissance du signal du message depuis les CHs vers les nœuds de capteur. Le CH avec la puissance de signal la plus élevée est choisi. Par conséquent, la qualité du canal entre les membres du cluster et le CH va être meilleure. Après la phase de diffusion, les nœuds capteurs informent le CH associé qu'ils seront membres du cluster, c'est ce que l'on appelle la phase de formation des clusters. Encore une fois, LEACH s'appuie sur un schéma CSMA d'accès aléatoire pour éviter les collisions entre les messages envoyés par chaque nœud. Enfin, la phase d'ordonnement est effectuée, les CHs attribuent le temps pendant lequel les nœuds capteurs peuvent envoyer des données aux CHs. Cette sélection est basée sur une approche TDMA (accès multiple par répartition dans le temps) qui est utilisée tout au long de la phase steady state phase.

**Steady phase** : Une fois la formation du cluster terminée lors de la setup phase, LEACH exécute la steady phase. Pendant cette phase, les nœuds capteurs peuvent commencer à détecter et à transmettre les données aux CHs. Les CHs regroupent les données des nœuds de leur cluster avant de les envoyer à la station de base. À la fin de la phase steady state phase, le réseau passe à nouveau dans la phase setup phase pour entrer dans un autre cycle de sélection de CHs. En conséquence, la consommation d'énergie due à la charge du CH est également répartie entre les nœuds capteurs.

Le fonctionnement en cluster de LEACH améliore l'efficacité énergétique des réseaux RCSF. Pendant la phase steady state phase, seuls les CHs sont actifs tout le temps. Un membre de cluster est actif uniquement pendant son créneau temporel alloué par le CH et la phase setup phase. Par conséquent, la consommation d'énergie d'un nœud non-CH est minimisée de manière significative. Puisque LEACH effectue une sélection périodique du CH, la charge de consommation d'énergie des nœuds CH est également partagée. En conséquence, LEACH réduit la consommation d'énergie de 4 à 8 fois par rapport à un protocole de routage à architecture plate [Heinzelman et al. \[2000\]](#).



FIGURE 2.7 – Protocole LEACH *Ababsa [2018]*

### 2.6.2.2 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Le protocole PEGASIS *Lindsey and Raghavendra [2002]* vise à apporter des améliorations au protocole LEACH. PEGASIS a pour but de remédier à la surconsommation d'énergie causée par la formation de clusters avec le protocole LEACH en construisant une chaîne de nœuds au lieu de clusters, comme le montre la Figure 2.8. Lorsque la construction de la chaîne est terminée, chaque nœud communique uniquement avec les deux voisins proches, précédant et suivant, afin d'envoyer et de recevoir des données. La construction de la chaîne est réalisée soit par les nœuds eux mêmes en utilisant un algorithme glouton, soit par la station de base puis diffusée à tous les nœuds. Elle commence toujours à partir des nœuds les plus éloignés de la station de base. La communication est initiée par l'un des nœuds choisi comme chain leader en utilisant un jeton. Elle se fait de manière séquentielle de telle sorte que chaque nœud agrège les données de son voisin précédent pour les envoyer à son voisin suivant jusqu'à ce que toutes les données parviennent au chain leader. Ce dernier, agrège à son tour toutes les données pour les envoyer à la station de bases.

#### Exemple

Un exemple de communication en chaîne est illustré sur la Figure 2.9. Le chain leader dans cet exemple est le nœud 2. Le nœud 2 transmet d'abord le jeton au nœud 0 pour lancer la communication. Le nœud 0 transmet ses données au nœud 1, qui agrège ces données avec les siennes pour créer un paquet de même longueur. Ce paquet est transmis au nœud 2. Une fois que le nœud 2 reçoit le paquet du nœud 1, il passe le jeton à l'autre extrémité de la chaîne, c'est-à-dire au nœud 6. Les informations des nœuds 6, 5, 4 et 3 sont également agrégées et envoyées au nœud 2 de la même manière. Lors de la réception des informations agrégées dans la chaîne, le nœud 2 utilise un seul saut pour transmettre les données au puits. Le protocole PEGASIS améliore les performances de LEACH en termes de consommation d'énergie. Cette amélioration est due aux coûts

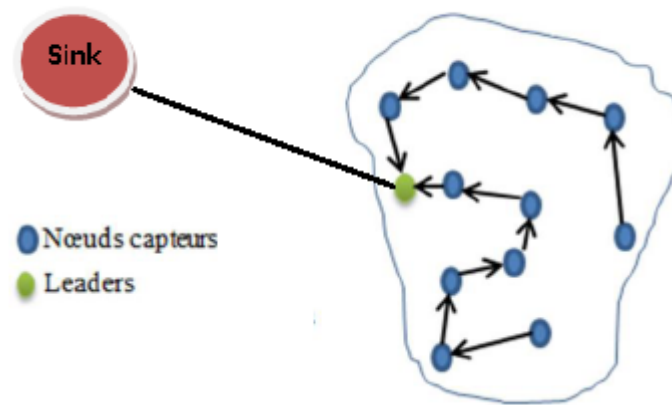


FIGURE 2.8 – Protocole PEGASIS [Ababsa \[2018\]](#).

limités lors de la communication en chaîne par rapport à la formation des clusters. Cependant, PEGASIS entraîne des retards importants car les données doivent être transmises séquentiellement dans la chaîne et le chain leader attend que tous les messages soient reçus avant de les communiquer au puits. De plus, PEGASIS exige que toutes les informations de la chaîne soient agrégées en un seul paquet, ce qui peut entraîner une imprécision dans les informations envoyées à l'utilisateur final [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#), [Lindsey et al. \[2001\]](#).

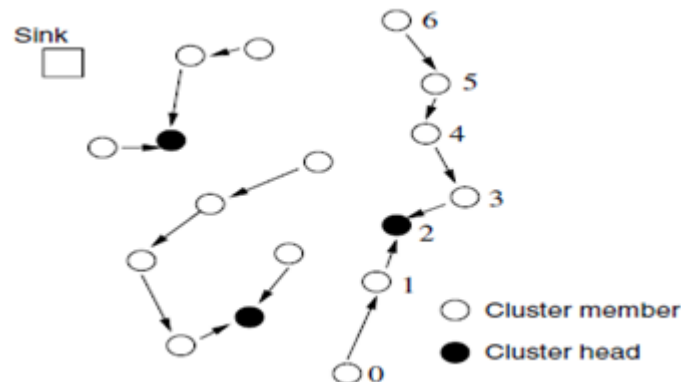


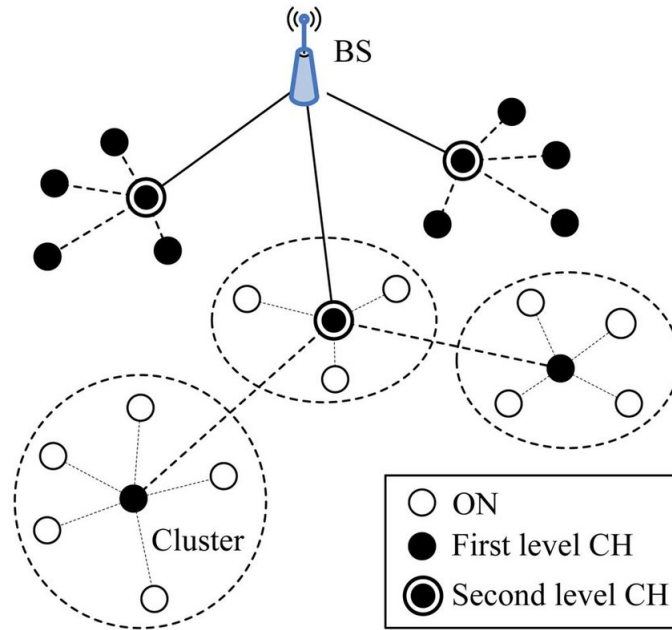
FIGURE 2.9 – Formation de la chaîne PEGASIS [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#).

### 2.6.2.3 TEEN (Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network) et AP-TEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network)

Les protocoles LEACH et PEGASIS prennent en charge les applications dans lesquelles les informations provenant des nœuds capteurs sont transmises périodiquement au puits. Par conséquent, le contenu de l'information de plusieurs nœuds est diminué par des techniques d'agrégation. Toutefois, ces protocoles peuvent ne pas répondre aux applications basées sur les événements, où les informations sont générées uniquement lorsque certains événements se produisent. Le protocole TEEN [Manjeshwar and](#)

[Agrawal \[2001\]](#) a pour but de fournir une diffusion événementielle dans le réseau. Comme son nom l'indique, les routes multi-sauts sont générées en fonction d'un seuil lié aux données sensorielles, qui est défini par l'application. Le protocole TEEN organise les nœuds capteurs en plusieurs niveaux de hiérarchie, comme illustré sur la Figure 2.10. Dans cette architecture hiérarchique, les données sont d'abord transmises par des nœuds de détection à Cluster-Heads (CHs), qui collectent, agrègent et transmettent ces données à un CH de niveau supérieur jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Afin de répartir uniformément la consommation d'énergie, les CHs sont périodiquement modifiées à l'intérieur du cluster. Basé sur cette structure de réseau hiérarchique, TEEN fournit une communication basée sur les événements à travers deux seuils : seuil hard (HT) et seuil soft (ST). Les nœuds de capteur sont programmés pour répondre aux changements d'attributs détectés, par exemple, la température, en comparant la valeur mesurée au seuil dur. Si le seuil dur HT est dépassé, le nœud capteur envoie ses données observées au CH. Par conséquent, les données sont collectées uniquement si un événement d'intérêt se produit. Il est clair que les événements peuvent durer longtemps, ce qui nécessite une transmission fréquente des données. Dans le but de réduire la redondance dans cette transmission, le seuil soft ST est utilisé. Chaque fois que le seuil dur est dépassé, le nœud capteur vérifie également le seuil soft pour des observations consécutives. Si la différence entre les observations consécutives ne dépasse pas le seuil soft, le nœud du capteur ne transmet pas cette information. Ceci informe le CH que des valeurs similaires sont observées. Les nouvelles observations ne sont transmises que si le seuil soft est dépassé. Par conséquent, le seuil dur limite les transmissions aux observations qui intéressent le puits (dépassent le seuil dur) et le seuil soft limite davantage les informations transmises lorsqu'il n'y a pas ou il y a peu de changements dans la valeur détectée. Puisque le protocole TEEN est basé sur des limites de seuil fixes, il ne convient pas aux rapports périodiques requis par certaines applications.

Dans le but de fournir une récupération périodique des informations, le protocole APTEEN [Manjeshwar and Agrawal \[2002\]](#) a été développé comme une amélioration du protocole TEEN. APTEEN fournit une structure basée sur la technique TDMA pour la transmission des informations de chaque cluster. Par conséquent, chaque nœud transmet périodiquement ses informations au CH. En outre, les valeurs de seuil hard et soft contrôlent quand et à quelle fréquence envoyer les données. Par conséquent, les applications basées sur les événements et les applications de surveillance peuvent être servies [Manjeshwar and Agrawal \[2001; 2002\]](#).

FIGURE 2.10 – Protocoles TEEN et APTEEN *Samara and Blaou [2017]*.

#### 2.6.2.4 Discussion

Les protocoles de routage hiérarchiques permettent d'obtenir une meilleure efficacité énergétique par rapport aux protocoles à topologie plate. En effet, la plupart des communications sont limitées à l'intérieur des clusters. Le mécanisme de clustering dans ces protocoles permet également une grande scalabilité au réseau RSCF. Aussi, le trafic généré dans le réseau est limité aux CHs des clusters. Cela permet de déployer des réseaux à grande échelle sans surcharge de trafic. Les informations sont transmises à un petit nombre de CHs tandis que le reste des nœuds effectuent des tâches simples. Cela améliore de manière significative la durée de vie globale du réseau. Cependant, malgré leurs avantages, les protocoles de routage hiérarchiques reposent largement sur les CHs et le risque de défaillance de ces derniers génère un problème de robustesse. En outre, la formation des clusters nécessite un échange de messages de contrôle supplémentaire, ce qui augmente la surcharge en cas de changement fréquent des CHs. Par conséquent, le compromis entre l'augmentation de la consommation d'énergie des CHs et la surcharge induite par la formation des clusters doit être pris en compte pour un fonctionnement efficace. D'autre part, la communication inter-clusters reste aussi un défi pour de nombreux protocoles de routage hiérarchique. En général, nous supposons que les CHs ont assez d'énergie pour communiquer directement avec la station de base. Cela ne permet pas d'utiliser ces protocoles dans des réseaux à grande échelle, où la communication à un saut avec la station de base est impossible. Pour résoudre ce problème, Il faut améliorer ces protocoles avec un mécanisme de communication inter-clusters multi-sauts.

Les simulations ont montré que LEACH réduit l'énergie de communication de  $1/8$  par rapport à la topologie plate. Aussi, il permet d'augmenter

la durée de vie du réseau grâce un clustering dynamique avec une rotation aléatoire des CHs. De plus, Il est basé sur un algorithme distribué qui ne nécessite pas une connaissance globale du réseau. Cependant, LEACH ne garantit pas la une bonne répartition des CHs dans le réseau. Il suppose que tous les CHs peuvent transmettre avec suffisamment de puissance pour atteindre la station de base. La sélection des CHs est aléatoire et non basée sur l'énergie restante. Les CHs peuvent mourir entre des rounds successifs (dans ce cas, leurs clusters deviendront inutiles car les données collectées par les nœuds du cluster n'atteindront jamais la station de base). Aucune détection pendant toutes les phases de configuration alors qu'il est sensé transmettre en continu.

En ce qui concerne le protocole PEGASIS, les simulations ont montré qu'il améliore nettement le protocole LEACH. Cette amélioration est due grâce à l'élimination de la surcharge induite par la formation des cluters, en la remplaçant par une chaine avec un seul chef (appelé leader). L'algorithme de glouton utilisé ne recherche que le voisin le plus proche qu'il peut atteindre pour lui transmettre les données. Cependant, les délais de transmission ne sont pas négligeables surtout pour les nœuds très éloignés de la station de base. Aussi, la défaillance d'un seul nœud nécessite un changement de chemin.

Enfin pour les protocoles de routage TEEN et APTEEN, la transmission des données à la station de base est conditionnée par des seuils hard et soft. De ce fait, les nœuds capteur dont les données captées sont toujours supérieures au seuil soft risquent l'envoi continu des données et l'épuisement de leurs énergies plus rapidement que ceux où les données captées ne le sont pas. Ce qui va créer un problème de couverture. De plus, l'utilisation de deux seuils ainsi que le clustering à plusieurs niveaux engendrent une surcharge non négligeable.

### 2.6.3 Routage Géographique

#### 2.6.3.1 GAF (Geographic Adaptative Fidelity)

Le protocole de routage GAF [Xu et al. \[2001\]](#) basé sur la localisation géographique des nœuds a pour objectif principal d'économiser l'énergie. Il divise le domaine d'intérêt en zones virtuelles de même taille. La taille est choisie de telle manière que chaque nœud dans une zone peut communiquer avec n'importe quel nœud dans les zones adjacentes. Chaque nœud doit connaître sa position géographique en utilisant un GPS intégré ou un algorithme de localisation. Chaque zone sera représentée par un seul nœud pour garder la connectivité avec le réseau et les autres nœuds jugés redondants passent à l'état de veille, où l'émetteur-récepteur est éteint pour économiser l'énergie.

La Figure 2.11 montre le fonctionnement du protocole GAF. Le cycle de vie des nœuds capteur est composé de trois états : veille, découverte et actif. Initialement, chaque nœud est en état découverte pour trouver ses voisins dans la même zone en échangeant des messages contenant (Node ID, Zone ID, Estimated node active time (enat) et Node state). Pour cela, il

arme un temporisateur avec un délai aléatoire  $T_d$ . S'il ne reçoit rien avant l'expiration de ce délai, il diffuse le message de découverte et passe en état actif, sinon, s'il reçoit un message de découverte d'un autre nœud plus prioritaire (l'ordre de priorité peut être arbitraire ou défini de telle manière à maximiser la durée de vie du réseau), il désarme son temporisateur et passe en état veille. Il reste dans cet état un temps  $T_s$  puis bascule vers l'état découverte à nouveau. Un seul nœud sera à l'état actif, ce nœud est le plus prioritaire. Il s'agit du nœud qui a armé son temporisateur avec un  $T_d$  le plus court. Ce dernier joue le rôle du représentant de la zone. En d'autres termes, c'est le seul nœud qui va participer au routage et gère la communication à l'intérieur de la zone. Un nœud, dès qu'il devient actif, il arme un temporisateur avec un délai  $T_a$  et continue à envoyer un message de découverte chaque  $T_d$ . S'il ne reçoit rien avant l'expiration du délai  $T_a$ , il passera à nouveau à l'état découverte, pour permettre à d'autres nœuds de jouer le rôle de représentant afin de répartir cette tâche consommatrice d'énergie entre tous les nœuds de la zone. Dans le cas contraire, il reçoit un message de découverte d'un autre nœud plus prioritaire. En conséquence, il passe à l'état veille parce qu'un autre nœud est actuellement actif.

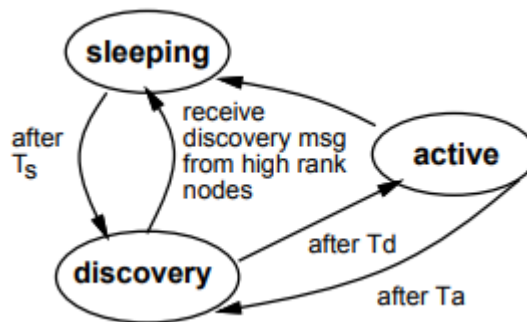


FIGURE 2.11 – Protocole GAF Xu et al. [2001].

### 2.6.3.2 GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)

L'idée clé du protocole GEAR Yu et al. [2001] est de limiter le nombre d'intérêts dans la diffusion dirigée (Directed Diffusion) en ne considérant qu'une certaine région plutôt que d'envoyer les intérêts à l'ensemble du réseau. Cela est possible en exploitant les informations géographiques comme des attributs dans les requêtes. GEAR utilise des heuristiques qui tiennent compte de l'énergie et de la distance pour la sélection des nœuds voisins afin d'acheminer un paquet vers la région de destination. De cette façon, le protocole GEAR peut économiser plus d'énergie que la diffusion dirigée. Chaque nœud calcule un coût estimé pour atteindre la région cible sans passer par les voisins et un coût appris pour atteindre la région cible par l'intermédiaire de ses voisins. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle et de la distance directe à la destination. Le coût appris est un coût évalué lors du routage et communiqué aux nœuds voisins pour ajuster le coût estimé et changer l'itinéraire du paquet suivant si nécessaire. Cela arrive quand il ya des trous dans le réseau. Un trou se produit lorsqu'un nœud n'a pas de voisin plus proche de la région cible

suite à un épuisement d'énergie. S'il n'y a pas de trous, le coût estimé est égal au coût appris. L'algorithme comporte deux phases [Yu et al. \[2001\]](#) :

- **Envoi des paquets vers la région cible** : À la réception d'un paquet, un nœud vérifie parmi ses voisins ceux qui sont plus proches de la région cible que lui. S'il y en a plusieurs, le plus proche voisin est choisi comme prochain saut. S'ils sont tous à la même distance que lui, cela signifie qu'il y a un trou. Dans ce cas, un des voisins est choisi pour acheminer le paquet en fonction du coût appris.
- **l'envoi des paquets dans la région** : Quand le paquet atteint la région, il peut être diffusé dans cette région par un acheminement géographique récursif en partageant à chaque itération la région concernée en quatre sous-régions et faire propager une copie du paquet dans chaque sous-région jusqu'à obtenir des régions avec un seul nœud, ou par diffusion restreinte qui est plus approprié lorsque les capteurs ne sont pas déployés de manière dense.

### 2.6.3.3 Discussion

Les protocoles de routage géographique utilisent des informations de localisation géographique pour décider du routage. Cela dit, chaque nœud connaît la position physique des autres nœuds. Il peut facilement connaître son voisinage sans pour autant construire des tables de routage de manière explicite. Il en résulte que les protocoles de routage géographique sont scalables. De plus, ces protocoles permettent une économie d'énergie à cause d'une faible complexité puisque les décisions de routage peuvent être prises sur la base d'informations locales. Cependant, ce routage est très dépendant de l'emplacement précis des nœuds. Une erreur dans la localisation peut être fatale pour le routage.

Le protocole GAF est un protocole hérité du routage Ad-hoc et adapté aux réseaux RCSF. Il se caractérise par un nœud actif représentant la zone de la grille virtuelle pour maintenir la connectivité. La simulation a montré que ce protocole améliore la durée de vie du réseau de manière significative. D'autre part, ce protocole peut être classé hiérarchique où la formation des clusters (dans ce cas zones géographiques) est basé sur la localisation des nœuds. Le représentant de la zone peut être considéré comme un CH responsable de la transmission des données sans pourtant assuré l'agrégation ou la fusion.

Le protocole GEAR a été comparé à un protocole de routage similaire, GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [Karp and Kung \[2000\]](#). Le protocole GEAR permet non seulement de réduire la consommation d'énergie lors de l'établissement des routes, mais il est également plus performant en termes de livraison de paquets que GPSR. Les résultats des simulations montrent que pour une répartition aléatoire du trafic, le protocole GEAR livre 70% à 80% de paquets de plus que le protocole GPSR. Tandis que dans le cas d'un trafic uniforme, le protocole GEAR fournit de 25% à 35% de paquets de plus que le protocole GPSR [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#).

## 2.6.4 Routage basé sur la Qualité de Service

### 2.6.4.1 SAR (Sequential Assignment Routing)

L'algorithme de routage par assignation séquentielle (SAR) [Sohrabi et al. \[2000\]](#) est le premier algorithme de routage qui tient compte de la qualité de service et l'efficacité énergétique pour décider de l'acheminement des données. Il crée des arbres multiples, où la racine de chaque arbre est un nœud voisin à un saut du puits. Chaque arbre se développe vers les autres nœuds du réseau à partir du puits tout en évitant les nœuds avec un faible débit ou un délai élevé de transmission. À la fin de la procédure, chaque nœud se trouve appartenir à un ou plusieurs arbres à la fois. Dès lors, le nœud capteur peut choisir le bon voisin en termes de qualité de service et l'énergie disponible pour transmettre les données.

#### Exemple

Un exemple de formation d'arbres est illustré sur la Figure 2.12. Il y a deux arbres ayant comme racine les nœuds A et B. Les racines A et B sont des voisins à un saut du puits. Le nœud C appartient aux deux arbres à la fois avec des longueurs de chemin de 3 et 5, respectivement, vers la station de base, en utilisant les deux arbres. Chaque nœud capteur enregistre deux paramètres sur chacun des chemins utilisés : les ressources énergétiques disponibles sur le chemin et une métrique QoS additive telle que le délai. Ce mécanisme permet à un nœud de choisir un chemin parmi plusieurs pour transmettre son message vers le puits.

L'algorithme SAR choisit un chemin avec des ressources énergétiques estimées élevées. Une métrique de QoS pondérée est calculée comme un produit de la QoS additive et le niveau de priorité du paquet transmis. Le routage garantit le maintien de la même métrique de QoS pondérée. Par conséquent, les paquets de priorité plus élevée prennent des chemins de QoS additive plus faible, et les paquets de priorité inférieure doivent utiliser les chemins avec de grandes QoS additives. Par exemple, si le nœud C génère un paquet de priorité 3, il suit le chemin le plus long sur l'arbre B, et un paquet de priorité 5 (priorité plus élevée) suivra le chemin le plus court sur l'arbre A. Le protocole SAR minimise la métrique de QoS pondérée moyenne tout au long de la durée de vie du réseau. La station de base déclenche périodiquement un processus de calcul des chemins à travers une mise à jour de la métrique de QoS additive. Ces mises à jour permettent de refléter les changements sur les ressources énergétiques disponibles au niveau de chaque nœud après un certain nombre de transmissions [Sohrabi et al. \[2000\]](#).



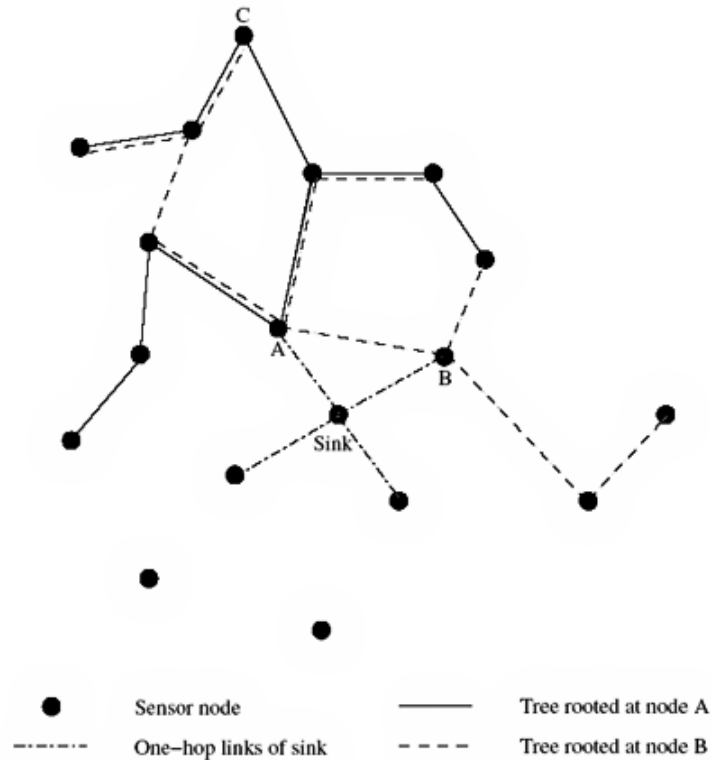


FIGURE 2.12 – Protocole SAR [Sohrabi et al. \[2000\]](#).

#### 2.6.4.2 SPEED

Le protocole SPEED [He et al. \[2003\]](#) permet de garantir une certaine vitesse pour la transmission de chaque paquet dans le réseau. SPEED donne la possibilité aux applications d'estimer le temps de bout en bout pour les paquets en divisant la distance jusqu'à la station de base par la vitesse du paquet pour décider de l'utilisation du chemin. En outre, SPEED met en œuvre ses propres mécanismes pour éviter les congestions. Le protocole SPEED possède un module de routage appelé "Stateless Geographic Non-Deterministic forwarding" (SNFG) qui coopère avec quatre autres modules au niveau de la couche réseau. L'estimation du délai de transmission au niveau de chaque nœud est calculée à partir du temps nécessaire pour la réception de l'ACK d'un voisin en réponse à un paquet de données transmis. En se basant sur ces délais, le SNGF sélectionne le nœud qui satisfait au mieux la vitesse exigée [He et al. \[2003\]](#).

#### 2.6.4.3 Discussion

Les protocoles de routage basés sur la QoS cherchent à satisfaire les exigences de certaines applications en termes de qualité de service telle que la latence, la fiabilité etc. lors de l'acheminement de l'information. Satisfaire ces exigences, nous permet de développer des protocoles plus élaborés. Cependant, le respect de ces exigences ne peut se faire qu'au détriment d'une surconsommation d'énergie et du raccourcissement de la durée de vie du réseau. De ce fait, la minimisation du coût énergétique pour assurer la QoS exigée doit être envisagée par tout protocole de

routage basé sur la QoS.

Le protocole SPPED consomme moins d'énergie grâce à la simplicité de l'algorithme de routage utilisé et du nombre réduit des paquets de contrôle échangés. De plus, son délai de transmission de bout-en-bout est suffisamment court pour assurer une bonne qualité de service.

En ce qui concerne le protocole SAR, les résultats des simulations ont montré qu'il est fiable grâce à des chemins redondants permettant un recouvrement facile en cas de défaillance des nœuds et une faible latence lors de la transmission vers la station de base grâce à la structure arborescente des chemins.

### **2.6.5 Synthèse des principaux protocoles de routage**

Nous concluons ce chapitre dédié au routage dans les RCSFs, par une synthèse des protocoles principaux en les classifiant selon la structure du réseau, les opérations du protocole, le paradigme de communication ainsi que l'établissement des routes. Par la suite, nous accentuons également les avantages et les inconvénients majeurs de chacun de ces protocoles.

TABLE 2.1 – Synthèse des principaux protocoles de routage.

Protocole	Structure du réseau	Opérations du protocole	Paradigme de communication	Établissement des routes
SPIN	Plate	Basé sur la négociation & Agrégation	Centré-données	Réactif
Directed Diffusion	Plate	Multi-chemins & Agrégation	Centré-données	Réactif
Rumor Routing	Plate	Basé-Requête & Agrégation	Centré-données	Réactif
Cougar	Plate	Basé-Requête, Agrégation	Centré-données	Réactif
GAF	Géographique		Centré-nœud	Proactif
GEAR	Géographique		Centré-données	Proactif
SPEED	Plate	QoS	Centré-données	Réactif
SAR	Plate	QoS & Agrégation	Centré-données	Réactif
LEACH	Hiérarchique	Agrégation	Centré-nœud	Proactif
PEGASIS	Hiérarchique	Agrégation	Centré-nœud	Proactif
TEEN	Hiérarchique	Agrégation	Centré-nœud	Proactif
APTEEN	Hiérarchique	Agrégation	Centré-nœud	Proactif

TABLE 2.2 – Avantages et inconvénients majeurs des principaux protocoles de routage.

Protocole	Avantage majeur	Inconvénient majeur
SPIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolérance au changement de topologie</li> <li>- Évite le problème d'implosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non évolutif</li> </ul>
Directed Diffusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le trafic est initié par la station de base à travers la diffusion des intérêts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inondations du réseau dues aux diffusions des intérêts</li> </ul>
Rumor Routing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limite l'inondation de tout le réseau par les requêtes</li> <li>- Optimise l'énergie la consommation d'énergie</li> </ul>	Problème d'adaptation aux applications avec un grand nombre d'événements <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inondation d'événements non intéressants pour la station de base</li> </ul>
Cougar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fournit une interface pour la gestion et l'interrogation du RCSF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite des mécanismes de synchronisation entre capteurs</li> </ul>
GEAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit le nombre d'intérêts émis comparé au protocole Rumor Routing</li> <li>- Réduit la consommation d'énergie lors de l'établissement des routes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Routage dépendant de l'emplacement précis des nœuds</li> </ul>
GAF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prolonge la durée de vie des réseaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Routage dépendant de l'emplacement précis des nœuds</li> </ul>
SPEED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de minimiser la consommation d'énergie</li> <li>- Permet de réduire les délais de transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La métrique d'énergie n'est pas prise en considération au cours des décisions de routage</li> </ul>
SAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recouvrement facile en cas de défaillance des nœuds</li> <li>- Faible latence lors des transmissions vers la station de base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La charge de maintenance des états des nœuds dans le cas des réseaux denses</li> </ul>

TABLE 2.3 – *Avantages et inconvénients majeurs des principaux protocoles de routage (suite).*

Protocole	Avantage majeur	Inconvénient majeur
LEACH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équilibrage de la consommation énergétique</li> <li>- Agrégation des données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les CHs sont choisis sans tenir compte de leur énergies restantes</li> <li>- Problème de couverture</li> </ul>
PEGASIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préserve l'énergie et optimise la durée de vie des réseaux en substituant la formation des clusters par un chaînage local</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le leader de la chaîne est choisi sans tenir compte de son énergie restante</li> </ul>
TEEN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Élimine les transmissions inutiles par les seuils (ST, HT)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chaque nœud doit avoir une connaissance globale du réseau</li> </ul>
APTEEN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seuils ST et HT paramétrables pour contrôler la fréquence d'envoi des données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le surcoût et la complexité associés à la formation d'une hiérarchie multi-niveau</li> <li>- Les seuils ST et HT sont fixes</li> <li>- Le surcoût et la complexité associés à la formation d'une hiérarchie multi-niveau</li> </ul>

## 2.7 CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les différentes classes des protocoles de routage destinés aux RCSFs. Nous nous sommes intéressés particulièrement à la classe de routage hiérarchique qui a fait ses preuves d'efficacité en termes de gestion de la consommation énergétique. En effet, la structure hiérarchique du RCSF permet de réduire la consommation énergétique des capteurs transmettant leurs données à des capteurs particuliers situés dans leur voisinage plutôt que de les acheminer vers la station de base qui est généralement éloignée du RCSF. Le routage hiérarchique se base principalement sur une fonction appelée clustering ou clustérisation. Le clustering est un mécanisme permettant de regrouper les capteurs les plus proches en clusters dans les différentes zones du RCSF. Le prochain chapitre est consacré à l'étude du mécanisme de clustering adopté par la plupart des protocoles hiérarchiques.

# CLUSTÉRISASSION DANS LE ROUTAGE HIÉRARCHIQUE

# 3

## SOMMAIRE

---

3.1	INTRODUCTION . . . . .	60
3.2	AVANTAGES DE LA CLUSTÉRISASSION . . . . .	62
3.3	DÉFIS DES ALGORITHMES DE CLUSTÉRISASSION . . . . .	62
3.3.1	Énergie limitée . . . . .	63
3.3.2	Ressources limitées . . . . .	63
3.3.3	Communication sécurisée . . . . .	63
3.3.4	Formation des clusters et sélection des CHs . . . . .	63
3.3.5	Synchronisation . . . . .	63
3.3.6	Qualité de Service (QoS) . . . . .	64
3.4	OBJECTIFS DE LA CLUSTÉRISASSION DANS LES RCSFs . . . . .	64
3.4.1	Évolutivité . . . . .	64
3.4.2	Tolérance aux pannes . . . . .	64
3.4.3	Agrégation/fusion de données . . . . .	65
3.4.4	Équilibrage de charge . . . . .	65
3.4.5	Maximisation de la durée de vie du réseau . . . . .	65
3.4.6	Connectivité accrue . . . . .	66
3.4.7	Réduction du délai d'acheminement . . . . .	66
3.4.8	Évitement des collisions . . . . .	66
3.4.9	Utilisation d'un schéma de veille . . . . .	67
3.5	SCHÉMAS DE CLUSTÉRISASSION POUR LES RCSFs . . . . .	67
3.5.1	Schémas auto-organisés . . . . .	67
3.5.2	Schémas assistés . . . . .	69
3.5.3	Schémas à critères multifactoriels . . . . .	70
3.6	CRITÈRES D'ÉVALUATION DES TECHNIQUES DE CLUSTÉRISASSION	71
3.6.1	Critères liés aux clusters . . . . .	71
3.6.2	Critères liés aux CHs . . . . .	72
3.6.3	Critères liés au processus de clustering . . . . .	73
3.7	CONCLUSION . . . . .	73

---

### 3.1 INTRODUCTION

Le regroupement des nœuds capteurs sous forme de clusters a été largement utilisé lors de la conception des protocoles de routage hiérarchiques destinés aux RCSFs. L'objectif principal derrière l'intérêt que les

chercheurs du domaine ont accordé aux techniques de clustering est de permettre aux protocoles d'assurer entre autres : l'évolutivité des réseaux, l'efficacité de la gestion énergétique et en conséquence la prolongation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil.

Les protocoles de routage hiérarchiques se basent sur la structuration des nœuds capteurs appartenant au réseau en clusters et l'agrégation des données au niveau de chaque cluster. Ces deux aspects permettent de réduire de manière significative la consommation énergétique au niveau des différents clusters constituant le RCSF par rapport aux protocoles de routage plat.

Dans une structure hiérarchique des réseaux, chaque cluster est géré par un chef appelé cluster-head (CH) qui sera responsable de l'agrégation des données, et leur transmission vers la station de base. Les nœuds capteurs qui ne jouent pas le rôle de cluster-head sont des membres ordinaires du cluster. Ces nœuds sont responsables de la capture puis la transmission des données observées vers leurs CHs respectifs. La Figure 3.1 montre une structure hiérarchique d'un réseau de capteurs sans fil suite au processus de clustering, les communications établies entre les différents CHs et la station de base (communications inter-clusters), ainsi que les transmissions de données entre les membres des clusters et leur CHs correspondants (communications intra-clusters).

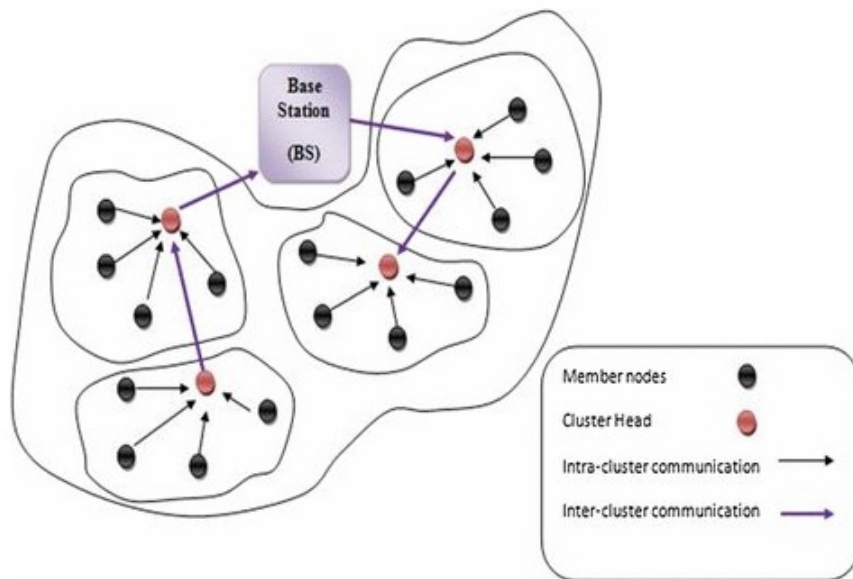


FIGURE 3.1 – Routage basé sur la technique de clustering *Rostami et al. [2018]*.

Au cours de ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des schémas de clustering existants dans la littérature des réseaux de capteurs sans fil. Tout d'abord, nous passons en revue les avantages de la structure avec clusters par rapport à la structure plate puis nous détaillons les défis qui doivent être pris en considération lors de la conception des algorithmes de clustering. Nous enchaînons avec une synthèse des schémas de clustering qui peuvent être adoptés lors de la conception des protocoles de



routage hiérarchique. Les schémas de clustering qui existent dans la littérature sont des schémas auto-organisés, assistés par la station de base ou les CHs et à critères multifactoriels. En conclusion de ce chapitre, nous soulignons les critères d'évaluation permettant de comparer les techniques de clustering à savoir : les critères liés aux clusters, liés aux CHs ou liés au processus de clustering.

### 3.2 AVANTAGES DE LA CLUSTÉRISATION

Le regroupement des nœuds capteurs en clusters dans un réseau RCSF a été largement adopté comme solution pour le routage par de nombreux travaux de la communauté scientifique. L'intérêt scientifique qui a été accordé aux techniques de clustérisation est justifié par les avantages suivants [Naeimi et al. \[2012\]](#) :

1. Les nœuds membres utilisent un chemin bien défini au sein du cluster ce qui permet de réduire la taille de la table de routage stockée individuellement au niveau des nœuds.
2. Le clustering peut également économiser la bande passante de communication car il limite la portée des interactions inter-clusters uniquement aux clusters-heads et évite les échanges redondants de messages entre les nœuds capteurs.
3. Le clustering participe à la stabilisation de la topologie au niveau des capteurs et permet de réduire le coût de maintenance de la topologie.
4. Les nœuds capteurs ne se focalisent que sur la connexion avec leurs CHs et ne seront pas affectés par les changements en dehors du cluster.
5. Seuls les CHs entre eux, forment le réseau de base, ce qui se traduit par une topologie beaucoup plus simple, avec moins de collisions et de messages échangés.
6. Le CH peut également mettre en œuvre des stratégies de gestion optimisées pour améliorer le fonctionnement du réseau et prolonger la durée de vie des batteries individuelles des capteurs et donc la durée de vie du réseau
7. Le CH peut planifier les activités dans le cluster afin que les nœuds puissent passer en mode veille et réduire le taux de consommation d'énergie.
8. Le CH peut agréger et fusionner les données collectées par les capteurs dans son cluster ce qui permet de diminuer le nombre de paquets relayés.

### 3.3 DÉFIS DES ALGORITHMES DE CLUSTÉRISATION

Les techniques de clustérisation jouent un rôle important dans le routage des réseaux de capteurs sans fil. Ils permettent d'améliorer efficacement les performances des réseaux. Cependant, Il existe plusieurs limites spécifiques aux RCSFs que les algorithmes de clustérisation doivent en tenir compte [Al-Karaki and Kamal \[2004\]](#), [Boyinbode et al. \[2010\]](#) :

### 3.3.1 Énergie limitée

Les capteurs sans fil possèdent une source énergétique très limitée sous forme de batteries. Il n'est pas possible de recharger ou de remplacer leurs batteries après épuisement. Les algorithmes de clustérisation sont plus efficaces sur le plan énergétique que les algorithmes de routage plat. Ceci peut être réalisé en équilibrant la consommation d'énergie au niveau des capteurs en optimisant la formation des clusters, en re-sélectionnant périodiquement les CHs en fonction de leur énergie résiduelle, et en assurant une communication efficace intra-cluster et inter-clusters.

### 3.3.2 Ressources limitées

La petite taille physique et la faible quantité d'énergie disponible dans les capteurs limitent les capacités de ces derniers en termes de traitement, de mémoire et de communication.

### 3.3.3 Communication sécurisée

La capacité d'un RCSF à fournir une communication sécurisée est de plus en plus importante surtout lorsqu'on utilise ces réseaux pour des applications militaires. L'auto-organisation d'un réseau dépend énormément de l'application pour laquelle il est déployé. L'établissement d'une communication intra et inter-clusters sûre et efficace sur le plan énergétique est l'un des défis importants à relever pour concevoir des algorithmes de clustérisation, car dans la plupart des cas, les capteurs ne sont pas surveillés lorsqu'ils sont déployés.

### 3.3.4 Formation des clusters et sélection des CHs

La formation des clusters et la sélection des CHs sont les opérations principales des algorithmes de clustérisation. La consommation excessive d'énergie des capteurs, dû à la transmission directe entre ces derniers et une station de base, peut être évité en structurant le réseau sous forme de clusters. La clustérisation améliore d'avantage l'extensibilité des applications du RCSF. Le choix de la taille optimale des clusters, l'élection et la réélection des CHs, et la maintenance des clusters sont les principaux problèmes à traiter lors de la conception des algorithmes de clustérisation. Les critères de sélection des CHs et la formation des clusters devraient minimiser la consommation énergétique.

### 3.3.5 Synchronisation

Lorsque nous envisageons un schéma de clustérisation, la synchronisation et l'ordonnancement auront un impact considérable sur les performances globales du réseau. Les schémas de transmission à créneaux temporels tels que la technique TDMA permettent aux nœuds de programmer régulièrement des intervalles de mise en veille afin de minimiser l'énergie utilisée. De tels schémas nécessitent des mécanismes de synchronisation pour établir et maintenir le calendrier de transmission.

### 3.3.6 Qualité de Service (QoS)

Les exigences en qualités de service dans les RCSFs dépendent énormément de l'application telles que le délai de transmission et la tolérance à la perte de paquets. Les algorithmes de clustérisation existants se concentrent principalement sur l'utilisation efficace de l'énergie du réseau, mais accordent moins d'attention à la prise en charge de la qualité de service dans les RCSFs. Les mesures de la QoS doivent être prises en compte lors du processus de conception des techniques de clustérisation.

## 3.4 OBJECTIFS DE LA CLUSTÉRISATION DANS LES RCSFs

La technique de clustérisation est utilisée dans les RCSFs pour atteindre un certain nombre d'objectifs permettant d'améliorer les performances du réseau sur différents plans. Ces objectifs ne sont pas tous au même niveau d'importance. La conservation d'énergie constitue un objectif principal, commun à tous les autres objectifs. Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu général sur les objectifs les plus importants de la clustérisation dans les RCSFs [Afsar and Tayarani-N \[2014\]](#), [Abbasi and Younis \[2007\]](#) :

### 3.4.1 Évolutivité

Dans plusieurs applications, le nombre de capteurs déployés peut atteindre des centaines ou des milliers de capteurs. Par conséquent, les protocoles de routage doivent être conçus pour fonctionner efficacement avec différentes tailles de réseau. La clustérisation permet de résoudre ce problème en regroupant les capteurs en plusieurs clusters, chacun d'eux est géré par un capteur ayant un rôle particulier appelé cluster-head (CH). Les CHs sont responsables de la communication interne aux clusters, l'agrégation des données et du routage vers la station de base, tandis que les capteurs membres d'un cluster s'occupent uniquement de la détection des événements dans leur environnement et la transmission vers le CH. De cette manière, le processus de clustérisation crée une architecture hiérarchique qui facilite le routage et augmente l'évolutivité du réseau de manière significative.

### 3.4.2 Tolérance aux pannes

La défaillance des capteurs ou l'épuisement de leurs énergies jusqu'à un certain seuil est toujours préjudiciable pour le réseau. En conséquence, la tolérance aux pannes est un défi important dans les RCSFs. Dans le cas d'un routage avec clustérisation, la défaillance dommageable concerne un petit nombre de capteurs qui sont les CHs. En effet, la panne des CHs doit être prise très au sérieux, car elle provoque l'isolement de tous les capteurs membres des clusters concernés et engendre une perte importante de données. La manière la plus intuitive de se remettre d'une défaillance d'un CH est de reclusterer à nouveau le réseau. Cependant, le reclustering n'est pas seulement une surcharge pour les capteurs, mais il est souvent très perturbateur pour le fonctionnement du réseau. Par conséquent, il

faut prévoir une tolérance aux pannes pour les CHs dans toute approche de routage basé sur la clustérisation. Le schéma de solution adoptée dans plusieurs travaux, est la sélection d'un assistant du CH ou un CH de secours pour la récupération après une défaillance du CH principal. Le rôle du CH de secours pendant le fonctionnement normal est la sauvegarde des données agrégées. En cas de défaillance, le CH de secours prend la relève. De plus, la rotation du rôle de CH entre les capteurs peut également se faire au moyen de la tolérance aux pannes dans le sens où l'épuisement de l'énergie de certains capteurs élus comme CHs est évité.

### 3.4.3 Agrégation/fusion de données

L'agrégation des données est une opération très importante dans les réseaux de capteurs. Dans un réseau à grande échelle, il existe souvent plusieurs capteurs qui détectent des informations similaires. L'agrégation des données consiste à éliminer la redondance et envoyer des informations utiles à la station de base. L'objectif principal est d'optimiser l'utilisation de la bande passante et de réduire la consommation d'énergie durant les communications. La clustérisation est une technique qui s'adapte bien à cette opération où l'agrégation et la fusion sont assurées par les cluster-heads. Pour bien exploiter l'agrégation, plusieurs approches de routage, utilisent une clustérisation à plusieurs niveaux où les données sont agrégées au niveau de plusieurs CHs avant d'être transmises à la station de base, ce qui permet une conservation d'énergie appréciable.

### 3.4.4 Équilibrage de charge

Une répartition uniforme des capteurs entre les clusters est un des objectifs important de la clustérisation pour maintenir la connectivité et prolonger la durée de vie d'un RCSF. En effet, une bonne répartition permet un équilibrage de charge entre les CHs des différents clusters. En fait, si les capteurs ne sont pas judicieusement affectés aux clusters, certains CHs peuvent être surchargés à cause du nombre élevé de capteurs dans leurs clusters. Cette situation augmente la dépense énergétique des CHs surchargés ainsi que le temps de latence et dégrade les performances globales du réseau. De ce fait, l'équilibrage de charge est très important lors de la conception des clusters. Cependant, en satisfaisant cet objectif, des capteurs peuvent être affectés à un cluster ayant un CH éloigné en termes de distance. Par conséquent, ils risquent d'épuiser rapidement leurs énergies à cause des transmissions de longue distance vers le CH. De plus, il faut faire tourner le rôle de CH entre tous les capteurs du réseau afin d'équilibrer la consommation d'énergie. Pour toutes ces raisons, la conception des algorithmes de clustérisation assurant un compromis entre l'équilibrage de charge au niveau des clusters et l'énergie individuelle des capteurs est inévitable.

### 3.4.5 Maximisation de la durée de vie du réseau

La prolongation de la durée de vie des RCSFs le plus longtemps possible est une préoccupation majeure, en particulier dans des environnements hostiles, à cause de l'accès difficile, et des ressources énergétiques

limitées des capteurs. Pour cette raison, il est nécessaire de concevoir des algorithmes de clustérisation moins coûteux en énergie en choisissant autant que possible des CHs plus proches des capteurs membres afin de minimiser la consommation d'énergie lors de la communication intra-cluster, et en faisant tourner le rôle de CH entre les capteurs de manière adaptative.

#### 3.4.6 Connectivité accrue

La connectivité permet d'assurer un chemin entre chaque nœud du réseau et la station de base durant toute la durée de vie du réseau, afin que les données captées puissent être transmises. Étant donné que les capteurs ne sont pas toujours à la même distance de la station de base, la consommation d'énergie ne va pas être la même entre les capteurs les plus éloignés et les capteurs les plus proches de la station de base lorsqu'un routage plat est utilisé. Par conséquent, certains capteurs vont perdre la connectivité avant les autres à cause de l'épuisement de leur énergie. La clustérisation permet de renforcer la connectivité qui doit être assurée dans ce cas, uniquement entre les CHs et la station de base. En effet, les capteurs membres des clusters ont besoin seulement d'une connectivité locale avec leurs CHs qui nécessite une faible consommation d'énergie.

#### 3.4.7 Réduction du délai d'acheminement

Plusieurs applications utilisant les réseaux de capteurs sans fil telles que le suivi des cibles de combat, la surveillance des événements d'urgence etc. exigent des informations en temps réel nécessitant un délai d'acheminement très court. Bien que les approches de routage basées sur la clustérisation visent principalement à assurer l'efficacité énergétique, elles réduisent de manière significative le délai d'acheminement par rapport à l'architecture plate. En effet, avec la technique de clustérisation, l'information transite par un nombre très réduit de capteurs alors qu'avec une architecture plate, elle est relayée par plusieurs capteurs, surtout si le réseau est dense.

#### 3.4.8 Évitement des collisions

Dans l'architecture plate avec un routage multi-sauts, chaque capteur utilise un support sans fil partagé indépendamment des autres. Par conséquent, plusieurs paquets peuvent rentrer en collision provoquant une retransmission de ces derniers. Le phénomène de collision augmente la consommation d'énergie dans le réseau et ne convient surtout pas aux réseaux à contraintes énergétiques. En utilisant les techniques de clustérisation, tous les capteurs d'un même cluster y compris son CH partagent le même support sans fil à travers un protocole MAC tel que Time Division Multiple Access (TDMA). Ce protocole évite les collisions et élimine le gaspillage d'énergie.

### 3.4.9 Utilisation d'un schéma de veille

Il existe des applications qui n'exigent pas un captage continu des données de l'environnement. En conséquence, il n'est pas nécessaire que tous les capteurs soient opérationnels à tout moment. Pour profiter de cette caractéristique, nous pouvons définir à un moment donné des capteurs actifs et des capteurs en mode veille afin d'économiser l'énergie. Utiliser cette technique avec une architecture plate alourdit le réseau avec un très grand nombre de messages de contrôle pour définir les capteurs actifs et les capteurs en veille. L'utilisation de la clustérisation permet de réduire cette tâche au niveau des clusters. Le CH de chaque cluster joue le rôle de l'orchestrateur en définissant les capteurs actifs et les capteurs en veille à travers le protocole MAC-TDMA.

## 3.5 SCHÉMAS DE CLUSTÉRISATION POUR LES RCSFs

Ces dernières années, les chercheurs ont manifesté un intérêt accru pour la clustérisation dans les protocoles de routage parce qu'elle permet une meilleure évolutivité avec une bonne efficacité énergétique. Le processus de clustérisation doit tenir compte, durant toutes ses étapes (sélection des CHs, formation des clusters, agrégation) ainsi que dans la transmission des données, des capacités limitées des capteurs. De ce fait, différents schémas de clustérisation ont été proposés pour satisfaire les objectifs cités dans la section précédente, tout en respectant les contraintes de capacité imposées. Ces schémas diffèrent essentiellement par leurs méthodes de sélection des CHs [Naeimi et al. \[2012\]](#).

### 3.5.1 Schémas auto-organisés

Dans ces schémas, la décision de sélection du CH est distribuée. Les capteurs sont en concurrence pour être sélectionnés en tant que CHs à travers l'évaluation d'une certaine condition. Les capteurs vérifiant la condition imposée seront sélectionnés comme CHs. Les autres capteurs seront des membres dans des clusters formés par ces CHs. Ces schémas peuvent être regroupés en deux catégories : les schémas purement probabilistes et les schémas adaptatifs basés sur différents paramètres.

#### 3.5.1.1 Clustering purement probabiliste

Dans le clustering probabiliste, les nœuds prennent des décisions autonomes sans aucun contrôle centralisé. Les CHs sont sélectionnés uniquement sur la base de l'évaluation d'une expression qui inclut certains paramètres fixes comme le nombre de CH, le nombre de rounds actuels, l'intervalle de temps ou l'identificateur du nœud. Le premier protocole populaire utilisant le clustering auto-organisé pour les RCSFs, est LEACH [Heinzelman et al. \[2000\]](#), qui utilise la génération aléatoire des nombres afin de répartir la consommation énergétique entre les nœuds du réseau. En utilisant LEACH, chaque nœud génère un nombre aléatoire entre 0 et

1. Le nœud ayant le nombre généré inférieur à  $T(n)$  se déclare CH :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P*(r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

tel que :

- $P$  est le pourcentage des CHs désiré.
- $r$  est le round actuel.
- $G$  est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été sélectionnés comme CH durant les  $1/P$  derniers rounds.

### 3.5.1.2 Clustering adaptatif

Dans les algorithmes de clustering, les CHs, en tant que coordinateurs locaux des clusters, jouent un rôle prépondérant dans les performances du réseau. Par conséquent, La position relative et la distribution uniforme des CHs en fonction de la densité des nœuds sont des caractéristiques importantes qui affectent grandement le choix des CHs. Pour cela, au lieu d'un choix purement probabiliste on utilise des schémas adaptatifs utilisant des critères qui tiennent compte des ressources des nœuds et d'autres facteurs déterminants dans la sélection pour obtenir des CHs optimaux. Plusieurs travaux scientifiques ont été consacrés au clustering adaptatif, tels que [Peng and Zhang \[2010\]](#), [Jang et al. \[2007\]](#), [Bian et al. \[2008\]](#), [Fan and Yu \[2007\]](#), [Fan and Zhou \[2006\]](#), [Handy et al. \[2002\]](#), [Jing and Hong \[2008\]](#), [Tao and Zheng \[2006\]](#), [Yu et al. \[2008\]](#), [Zhang et al. \[2010\]](#). Nous pouvons classer ces critères qui améliorent les schémas de sélection stochastiques en trois catégories : l'énergie restante, la dispersion de la densité et la couverture.

1. **Energie restante** : La sélection des nœuds ayant la plus grande énergie restante comme CH est tout à fait souhaitable. Pour cela, on utilise des critères de sélection qui favorisent les nœuds avec un niveau plus élevé d'énergie restante d'être sélectionnés comme CH [Peng and Zhang \[2010\]](#), [Jang et al. \[2007\]](#).
2. **Dispersion de la densité** : La dispersion des CHs doit être conforme à la densité des nœuds dans le réseau. Nous souhaitons avoir plus de CHs dans les zones dense pour conserver plus d'énergie. Dans [Chang and Kuo \[2006\]](#), un mécanisme est présenté pour sélectionner le CH (Maximum Energy Cluster-head (MECH) en fonction du nombre de voisins à un saut. LEACH-sin [Li et al. \[2010\]](#) se concentre sur la distribution asymétrique des CHs et modifie la probabilité de sélection des CHs dans un cercle sinusoïdal autour de la station de base. Dans [Pen et al. \[2010\]](#), les auteurs proposent un schéma de clustering basé sur la densité d'énergie et de la distribution des CHs (UCS-ED)
3. **Couverture** : Éviter les trous (régions non-couvertes) dans le réseau RCSF devrait être une priorité absolue. Dans [Hasbullah and Nazir \[2010\]](#), les auteurs proposent la zone de couverture en plus de l'énergie résiduelle comme métrique combinée pour la sélection des CHs. Un autre algorithme qui tient compte de la couverture est présenté dans [Tsai \[2007\]](#), chaque nœud calcule sa zone de détection effective

normalisée estimée à travers la connaissance de sa zone de détection chevauchée. Les nœuds ayant une large zone de détection effective ne seront pas sélectionnés comme CH.

### 3.5.2 Schémas assistés

Les schémas distribués ne fournissent aucune garantie quant au placement équitable des CH ainsi que leur nombre au sein du réseau. De plus, ils imposent l'échange d'un grand nombre de messages de contrôle, ce qui réduit la durée de vie globale du réseau. À cet égard, des schémas assistés par les stations de base et les CHs sont proposés pour assurer un placement équitable et un nombre optimal de CH afin d'atténuer la dépense énergétique des nœuds lors du clustering.

#### 3.5.2.1 Clustering assisté par la station de base

Dans ce clustering, les tâches de sélection des CHs ainsi que la formation des clusters sont confiées à la station de base à cause de ses ressources inépuisables d'énergie et de ses capacités de traitement élevées. De plus, il donne également la main à l'utilisateur final pour contrôler le placement et le nombre de CH par le biais de la station de base en fonction des caractéristiques du réseau et du type d'applications. Cependant, cela implique la mise à jour périodique de la station de base avec les informations nécessaires sur les nœuds capteurs.

##### 1. Placement équitable des CHs

Le placement des CHs dans chaque round par apport aux autres nœuds est très important pour la préservation d'énergie. Parmi les travaux qui se sont intéressés à cet aspect, il existe une version centralisée de LEACH appelée LEACH-Centralized (LEACH-C) qui a été présentée dans [Heinzelman et al. \[2002\]](#) pour remédier aux lacunes de LEACH en ce qui concerne le placement et le nombre des nœuds CH. Durant la phase initiale de LEACH-C, chaque nœud transmet son emplacement et son niveau d'énergie à la station de base, qui va en suite, calculer un niveau d'énergie moyen du réseau. Les nœuds dont le niveau d'énergie résiduelle restant est inférieur à cette moyenne ne peuvent pas être élus CHs durant le round courant. De cette façon, le protocole LEACH-C assure un placement équitable des CHs.

##### 2. Nombre optimal de CHs

Le nombre de CHs est un facteur déterminant dans les performances des algorithmes basés sur les clusters. Il y a deux questions liées à ce sujet, d'abord le nombre optimal de CHs dans un réseau, et ensuite la variation du nombre de CHs sélectionnés par round par apport à la valeur optimal. Les simulations ont montré que le nombre optimal de CHs pour un réseau de 100 nœuds est autour de 3 à 5. Le pourcentage souhaité de CHs dans l'équation de seuil de LEACH pour maximiser la durée de vie du réseau est d'environ 5%. Cependant, cette valeur n'est pas respectée dans chaque round.



### 3.5.2.2 Clustering assisté par les CHs

De part leur rôle dans les clusters, les CHs peuvent collecter les états des membres des différents clusters grâce à des communications continues lors des phases de transmission des données. Tirant profit de ces informations, les CHs du round courant peuvent aider à la sélection des CHs du round suivant afin d'équilibrer les clusters et minimiser les dépenses d'énergie supplémentaires lors des phases de re-clustering. Les auteurs dans [Kim et al. \[2008\]](#) ont proposé une nouvelle méthode de sélection des CHs en fonction du nombre de nœuds dans le cluster et du nombre de CHs dans la portée de transmission des nœuds. L'objectif principal de l'algorithme présenté est de distribuer équitablement les CHs et d'équilibrer les tailles des clusters.

### 3.5.3 Schémas à critères multifactoriels

D'après les sections précédentes, nous déduisons que le choix optimal du CH qui permet d'améliorer les performances du réseau, est un problème multifactoriel, qui dépend du type de l'application, de la topologie du réseau et des capacités des nœuds. À cet égard, la sélection du CH doit être considérée comme une question de décision à variables multiples avec une interrelation complexe entre les facteurs. Les solutions proposées pour le processus complexe de sélection des CH sont le processus d'analyse hiérarchique (PAH) et le contrôleur en logique floue (CLF).

#### 3.5.3.1 Processus d'Analyse Hiérarchique (PAH)

PAH [Saaty \[2000\]](#) est une technique structurée pour organiser et analyser des décisions complexes. Dans la technique PAH, une décision complexe est décomposée en une hiérarchie de sous-problèmes plus faciles à comprendre à l'aide de valeurs numériques. Dans [Yin et al. \[2006\]](#), la technique PAH est utilisée pour la sélection des CHs en considérant trois facteurs : l'énergie, la mobilité et la distance par rapport au centre du cluster pour maximiser la durée de vie du réseau. Dans [Ahmed et al. \[2008\]](#), les auteurs ajoutent aux facteurs considérés dans [Yin et al. \[2006\]](#), l'indice de vulnérabilité.

#### 3.5.3.2 Le contrôleur en logique floue (CLF)

Beaucoup d'algorithmes proposent un mécanisme de sélection des CHs basé sur la logique floue (FL). La logique floue est une méthodologie de système de contrôle de résolution des problèmes qui fournit un moyen simple d'arriver à une conclusion basée sur un langage descriptif. Dans [Anno et al. \[2007\]](#), la distance du centroïde du cluster, la puissance restante de la batterie du capteur et le trafic réseau sont définis comme trois paramètres linguistiques d'entrée du FLC, tandis que la probabilité de sélection du CH est le paramètre de sortie souhaité. Les auteurs dans [Gupta et al. \[2005\]](#) introduisent FLC pour la phase de sélection des CH. Trois variables floues pour mesurer l'énergie, la centralité et la concentration des nœuds sont utilisées pour optimiser la procédure de sélection des CHs et prolonger la durée de vie des réseaux.

## 3.6 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES TECHNIQUES DE CLUSTÉRISSATION

La plupart des techniques de clustering se compose de deux étapes principales : la sélection des nœuds CH et la formation des clusters. Lors de la première étape, un certain nombre de nœuds sont sélectionnés comme CH. Durant la seconde étape, les nœuds qui ne sont pas CH seront affectés aux nœuds sélectionnés comme CHs pour former les clusters. A la fin de l'étape de formation des clusters, chaque nœud se voit attribuer un statut. Certains nœuds jouent le rôle de CH et le reste des nœuds sont considérés comme des membres du cluster. Dans le but de juger la qualité des techniques de clustering et comparer les différents algorithmes, il convient de préciser un certain nombre de critères d'évaluation. Dans la littérature, les techniques de clustering destinés aux RCSFs peuvent être généralement évalués selon Liu [2012], Mamalis et al. [2009], Afsar and Tayarani-N [2014] :

- Des critères liés aux clusters
- Des critères liés aux CHs
- Des critères liés au processus de clustering

### 3.6.1 Critères liés aux clusters

#### 3.6.1.1 Nombre de clusters

Le processus de formation des clusters que se soit avec élection aléatoire ou probabiliste ou adaptative des CHs donne obligatoirement un nombre variable de clusters. Pour avoir un nombre constant (fixe) de clusters, il faut déterminer le nombre de CH au préalable. C'est le cas de plusieurs approches dans la littérature. Un nombre optimal de clusters doit être cherché pour l'efficacité du clustering dans le processus de routage.

#### 3.6.1.2 Taille du cluster

Quelque soit le degré d'uniformité exigé par l'algorithme de clustering, le processus de formation des clusters de la plupart des protocoles de routage dans la littérature conduit naturellement à des clusters de tailles variables à cause du déploiement aléatoire des nœuds capteurs. Les clusters de même taille peuvent être envisagés dans le cas d'un déploiement déterministe.

#### 3.6.1.3 Communication intra-clusters

La plupart des approches de routage à base de clustering utilisent une communication à un saut (directe) à l'intérieur des clusters. Chaque membre communique directement avec le CH. Cependant, d'autres approches adoptent une communication multi-sauts en intra-cluster pour conserver davantage l'énergie des nœuds, notamment dans les grands clusters où certains nœuds peuvent être éloignés du CH.

#### 3.6.1.4 Communication inter-clusters

Sur le plan communication inter-cluster, les algorithmes de routage utilisant le clustering peuvent être classés en routage à un saut et multi-sauts. Dans le routage à un saut, les CHs communiquent directement avec la station de base alors que dans le routage multi-sauts, chaque CH communique avec la station de base via d'autres CHs plus proches.

#### 3.6.1.5 Affectation des nœuds aux clusters

Une fois les CHs sélectionnés, l'affectation des nœuds aux clusters commence. La plupart des algorithmes utilise principalement la distance euclidienne entre le nœud et le CH (on choisit le CH le plus proche). Cependant, pour équilibrer la densité énergétique dans un déploiement aléatoire, on ajoute le nombre de nœuds par cluster pour ne pas avoir des clusters surchargés et d'autres moins chargés.

### 3.6.2 Critères liés aux CHs

#### 3.6.2.1 Types des nœuds

Les nœuds d'un réseau de capteur peuvent être homogènes de même capacité sur le plan énergétique, ressources de calcul et de communication ou hétérogènes avec des capacités différentes. Dans le cas homogène, les CHs sont sélectionnés de manière aléatoire, probabiliste ou adaptative. Dans le cas probabiliste ou adaptatif, certains paramètres peuvent jouer un rôle dans cette sélection. En effet, le paramètre énergie peut être utilisé de sorte que les nœuds avec une énergie plus élevée aient plus de chances d'être élus CH. Le paramètre distance entre nœuds peut également avoir un rôle dans cette sélection pour bien couvrir le champ d'intérêt. D'autres paramètres tels que la taille des clusters ou le nombre de voisins peuvent aussi affecter la sélection des CHs. Cependant, dans le cas Hétérogène, les capteurs ayant plus de capacité seront prédéfinis comme CHs au préalable.

#### 3.6.2.2 Mobilité

Dans une configuration réseau avec des nœuds stationnaires, le processus de clustering génère naturellement des clusters stables avec gestion facile des communications intra et inter clusters. Dans le cas contraire, les CHs sont mobiles et l'appartenance à un cluster pour chaque nœud change de manière dynamique, ce qui nécessite une maintenance continue du cluster.

#### 3.6.2.3 Rôle

Le rôle principal du CH dans tout algorithme de routage hiérarchique est de relayer les informations provenant des nœuds membres vers la station de base. Pour ce faire, le CH se voit attribuer d'autres rôles complémentaires comme l'orchestration des nœuds membres pour éviter les collisions intra-cluster à travers la synchronisation de la communication

à l'intérieur du cluster, et aussi assuré l'agrégation et la fusion des données avant de les envoyer à la station de base pour conserver l'énergie et optimiser l'utilisation de la bande passante.

### **3.6.3 Critères liés au processus de clustering**

#### **3.6.3.1 Mode de contrôle**

Le clustering peut être centralisé, distribué ou hybride. Dans le clustering centralisé, la station de base exécute l'algorithme de clustering puis diffuse l'information à tous les nœuds. Dans le clustering distribué, chaque nœud exécute un algorithme indépendamment des autres pour décider de son rôle (CH ou membre). Dans le schéma hybride, la sélection des CHs et la formation des clusters peuvent être à la fois centralisée et distribuée.

#### **3.6.3.2 Temps de convergence**

La complexité temporelle est un facteur très important à prendre en considération lors de la conception. Certains algorithmes de clustering convergent en un temps variable en fonction des spécifications du réseau RCSF comme la taille du réseau et le nombre de CH exigé tandis que d'autres convergent en un temps constant quelque soit le réseau.

#### **3.6.3.3 Choix des CHs**

L'étape de sélection des CHs a un impact direct sur l'efficacité de l'algorithme de clustering et la durée de vie du réseau. Une sélection optimale des CHs peut réduire considérablement la consommation d'énergie. La majorité des algorithmes de routage dans les réseaux RCSF calculent les CHs en premier lieu, puis chaque CH forme son propre cluster. Cependant, on peut former des clusters sans passer par les CHs. Dans ce schéma, les CHs seront sélectionnés après la formation des clusters. D'autre part, lorsque la sélection des CHs devient un processus long et compliqué, elle peut imposer une surcharge au réseau entraînant une surconsommation d'énergie. Un équilibre doit être établi entre un choix optimisé des CHs et la consommation d'énergie résultant de la surcharge imposée. Aussi, une distribution non uniforme des CHs peut rendre la distance entre les nœuds membres du cluster et leur CH plus longue. En d'autres termes, les communications intra-cluster consomment plus d'énergie. Enfin, le délai nécessaire pour sélectionner les CHs et former les clusters peut aussi influencer sur la qualité du clustering.

## **3.7 CONCLUSION**

Le clustering dans les réseaux de capteurs a connu un intérêt particulier de la part des chercheurs du domaine ce qui a permis une production scientifique importante en termes de conception de protocoles hiérarchiques.

À travers ce chapitre, nous avons présenté une étude approfondie sur les techniques de clustering existantes dans la littérature. Nous avons mis l'accent sur les avantages du clustering, ses défis, ses objectifs, ses différents schémas et enfin les critères d'évaluation permettant de comparer les différents algorithmes adoptés pour le clustering.

Dans cette thèse, nous présentons une nouvelle approche de clustering basée sur l'algorithme MCL dédié à la théorie des graphes que nous avons adapté aux réseaux de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant, nous expliquons le principe de l'algorithme MCL puis nous détaillons la conception du protocole hiérarchique proposé basé sur le processus MCL pour la formation des clusters et une nouvelle stratégie combinant l'énergie résiduelle des capteurs et leur proximités par rapport à la station de base et aux attracteurs des clusters pour la sélection des CHs.

# CONTRIBUTION : MCL BASED CLUSTERING ROUTING PROTOCOL (MCL-BCRP )

# 4

## SOMMAIRE

---

4.1	INTRODUCTION . . . . .	75
4.2	ALGORITHME MCL - MARKOV CLUSTER ALGORITHM . . . . .	76
4.2.1	Principe de l'algorithme MCL . . . . .	76
4.2.2	Opérateur d'expansion . . . . .	77
4.2.3	Opérateur d'inflation . . . . .	77
4.2.4	Matrice de Markov . . . . .	78
4.2.5	Pseudo-code de l'algorithme MCL . . . . .	78
4.2.6	Convergence de l'algorithme MCL . . . . .	79
4.2.7	Interprétation des clusters . . . . .	79
4.3	ARCHITECTURE DU PROTOCOLE MCL-BCRP . . . . .	79
4.4	ÉTAPE DE CONFIGURATION . . . . .	80
4.4.1	Phase de détection et de modélisation du RCSF . . . . .	80
4.4.2	Phase de clustérisation et validation . . . . .	81
4.4.3	Phase de sous-clustérisation . . . . .	83
4.4.4	Phase de diffusion de la configuration . . . . .	84
4.5	ÉTAPE DE COMMUNICATION . . . . .	84
4.5.1	Phase de configuration . . . . .	85
4.5.2	Phase stable . . . . .	85
4.6	CONCLUSION . . . . .	86

---

## 4.1 INTRODUCTION

Le protocole hiérarchique que nous avons proposé et baptisé MCL-BCRP (MCL Based Clustering Routing Protocol) a pour but principal de réduire la consommation énergétique induite par les communications sans fil dans les réseaux de capteurs. À l'image de la plupart des protocoles de routage hiérarchique, MCL-BCRP utilise la technique du clustering qui a prouvé sa grande efficacité dans la gestion énergétique des réseaux de capteurs sans fil. Le protocole proposé utilise l'algorithme MCL pour organiser les réseaux de capteurs sous forme de structure hiérarchique, et sélectionne le cluster-head avec une stratégie combinant sa proximité de

la station de base, et du centre de gravité du cluster.

Ce chapitre présente le protocole hiérarchique MCL-BCRP. La première partie est consacrée à l'algorithme MCL. Nous aborderons les fondements théoriques de cet algorithme, ensuite nous détaillerons son principe et discuterons sa convergence. La deuxième partie est dédiée à la description de l'architecture du protocole proposé, la configuration de la topologie du RCSF et le routage des données depuis les différents membres des clusters jusqu'à la station de base.

## 4.2 ALGORITHME MCL - MARKOV CLUSTER ALGORITHM

Le protocole MCL-BCRP combine l'algorithme MCL (Markov CLuster algorithm) pour la formation des clusters et une nouvelle stratégie de sélection de CH basée sur la localisation et l'énergie résiduelle des nœuds capteurs. L'algorithme MCL a été développé par Stijn Van Dongen afin de simuler des flux stochastiques dans des graphes [Van Dongen \[2000; 1998\]](#). L'algorithme MCL a été appliqué dans différents domaines, principalement en bioinformatique. De plus, il s'agit d'une approche largement utilisée pour extraire des informations significatives à partir des réseaux biologiques [Enright et al. \[2002\]](#), [Shih and Parthasarathy \[2012\]](#), [Ochieng et al. \[2016\]](#), [Azad et al. \[2018\]](#).

### 4.2.1 Principe de l'algorithme MCL

Dans cette section, nous soulignons quelques notions théoriques de base sous-jacentes à l'algorithme MCL. La clustérisation des graphes est le processus de regroupement des sommets de graphes en clusters à travers des liens qui les relient. Nous pouvons facilement remarquer, sur la Figure 4.1, que les liens au sein d'un cluster sont plus nombreux que ceux entre les clusters. Cela signifie que si une marche aléatoire commence à un sommet et progresse vers un autre, il y a plus de chances de rester à l'intérieur du même cluster plutôt que de passer à un autre. Cette notion de marche aléatoire est l'idée de base de l'algorithme MCL et de plusieurs algorithmes de clustérisation des graphes. Il est possible d'identifier où le flux a tendance à se rassembler en effectuant des marches aléatoires sur le graphe. De ce fait, il est également possible de découvrir où se trouvent les clusters dans un graphe, en explorant les régions dans lesquelles le flux est renforcé. Les marches aléatoires sur un graphe sont déterminées en utilisant des chaînes de Markov constituées de matrices de transition stochastiques. Par conséquent, la simulation d'un flux à travers un graphe peut être réalisée en le transformant en une chaîne de Markov représentée sous forme de matrices de Markov stochastiques.

L'algorithme MCL génère une séquence de matrices stochastiques en alternant deux opérateurs mathématiques qui sont l'expansion et l'inflation à partir d'une matrice de transition en entrée. Les opérateurs d'expansion et d'inflation jouent des rôles complémentaires pour l'algorithme MCL. En effet, l'opérateur d'inflation est responsable de l'augmentation

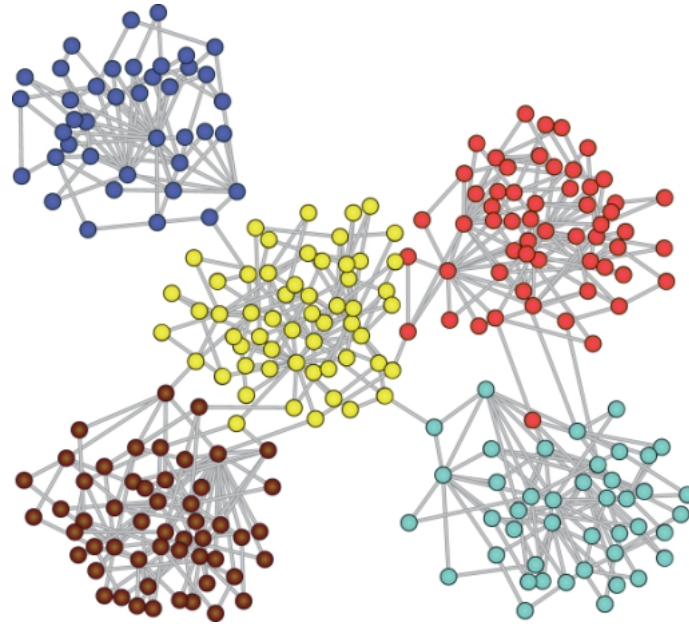


FIGURE 4.1 – Exemple de graphes avec clusters.

ou de la diminution du flux, tandis que l'opérateur d'expansion permet au flux de connecter différentes régions du graphe [Van Dongen \[2000; 1998\]](#).

#### 4.2.2 Opérateur d'expansion

Le flux peut être renforcé en calculant les puissances des matrices stochastiques. En d'autres termes, le renforcement du flux peut se faire en appliquant l'opérateur d'expansion. Cette expansion correspond au calcul des marches aléatoires de longueur supérieure à 1, c.à.d. les marches aléatoires avec plus d'un pas. L'expansion permet d'associer de nouvelles probabilités à toutes les paires de nœuds  $(i, j)$  dans les matrices stochastiques, où  $i$  représente le point de départ et  $j$  la destination de la marche aléatoire. Nous pouvons constater que les chemins de longueur supérieure à 1 sont plus fréquents au sein des clusters plutôt qu'entre les clusters. En d'autres termes, les probabilités associées aux paires  $(i, j)$  d'un même cluster sont, en général, relativement importantes car il existe de nombreuses façons de se déplacer du nœud  $i$  vers le nœud  $j$ .

Considérons  $M \in R^{k \times l}$ , une matrice à coefficients positifs, et  $e$  un nombre réel positif. L'application de l'opérateur d'expansion  $Exp_e$  de coefficient (ou puissance)  $e$  à la matrice  $M$  fournit une matrice positive  $Exp_e(M)$  appartenant au même domaine  $R^{k \times l}$ . Plus formellement, l'action  $Exp_e : R^{k \times l} \rightarrow R^{k \times l}$  est donnée par [Van Dongen \[2000; 1998\]](#) :

$$Exp_e(M) = M^e \quad (4.1)$$

#### 4.2.3 Opérateur d'inflation

L'inflation a pour rôle, comme cité auparavant, d'augmenter les probabilités des marches à l'intérieur des clusters et de les diminuer entre les



clusters. Bien entendu, cela se fait sans connaissance préalable de la structure des clusters du graphe en entrée. L'inflation possède également un rôle aussi important que le premier qui est le contrôle de la granularité des clusters obtenus. Une faible inflation conduit à des clusters plus grossiers, alors qu'une forte inflation conduit à des clusters plus fins [Van Dongen \[2000\]](#), [Macropol \[2009\]](#).

L'inflation du flux est calculée par le produit Hadamard combiné à une mise à l'échelle des colonnes des matrices stochastiques. Considérons  $M \in R^{k \times l}$ , une matrice à coefficients positifs, et  $r$  un nombre réel positif. L'application de l'opérateur d'inflation  $Inf_r$  de coefficient (ou puissance)  $r$  à la matrice  $M$  fournit une matrice positive  $Inf_r(M)$  appartenant au même domaine  $R^{k \times l}$ . Plus formellement, l'action  $Inf_r : R^{k \times l} \rightarrow R^{k \times l}$  est définie par [Van Dongen \[2000; 1998\]](#) :

$$Inf_r(M)_{pq} = \frac{(M_{pq})^r}{\sum_{i=1}^n ((M_{iq})^r)} \quad (4.2)$$

Notons que la puissance d'inflation  $r$  contrôle l'ampleur du renforcement ou l'affaiblissement du flux. Ce phénomène implique une influence directe de la puissance d'inflation sur la granularité des clusters formés.

#### 4.2.4 Matrice de Markov

Soit  $G$  un graphe, sa matrice associée  $M$  est définie par :  $M_{ij} = 1$  s'il existe un lien reliant le sommet  $i$  au sommet  $j$ ,  $M_{ij} = 0$  sinon. La matrice de Markov  $T_G$  ou matrice de transition correspondant au graphe  $G$  est déduite de la matrice associée  $M$  comme suit :

$$T_G = Md^{-1} \quad (4.3)$$

où,  $d$  est la matrice diagonale relative à  $M$  en sommant les poids par colonne. D'où,  $d_{ii} = \sum_k M_{ki}$  et  $d_{ij} = 0$ , avec  $i \neq j$  [Van Dongen \[2000; 1998\]](#).

#### 4.2.5 Pseudo-code de l'algorithme MCL

Le pseudo-code de base de l'algorithme MCL s'énonce comme suit :

---

**Algorithme 1** :  $MCL(T_G, e_{(i)}, r_{(i)})$

---

**Result** :  $T_{2k+1}$  encoding the clustering of the graph  $G$

$T_1 = T_G$  ;

**for**  $k$  *in*  $1.. \infty$  **do**

$T_{2k} = Exp_{e_k}(T_{2k-1})$  ;

$T_{2k+1} = Inf_{r_k}(T_{2k})$  ;

**if**  $T_{2k+1}$  *is doubly-idempotent* **then**

        | break;

**end**

**end**

Interpret  $T_{2k+1}$  as a clustering of the graph  $G$  ;

---

Nous pouvons facilement remarquer que l'algorithme MCL alterne les deux opérateurs matriciels qui sont l'inflation et l'expansion jusqu'à

convergence de l'algorithme. La convergence est atteinte lorsque l'algorithme MCL aboutit à un état stable. L'état stable est défini par l'obtention d'une matrice stochastique doublement idempotente par rapport à l'opérateur d'expansion et l'opérateur d'inflation [Van Dongen \[2000; 1998\]](#).

#### 4.2.6 Convergence de l'algorithme MCL

En pratique, dès les premières itérations du processus MCL, les poids calculés sont plus élevés pour les liens appartenant aux clusters par rapport aux poids des liens situés entre les clusters. Le processus MCL converge en générant une matrice dite doublement-idempotente. La double idempotence de la matrice de convergence est relative aux opérateurs d'expansion et d'inflation. La convergence de l'algorithme MCL n'a pas été prouvée théoriquement. Cependant, en cas de convergence, il a été montré que l'algorithme MCL converge quadratiquement au voisinage des matrices doublement-idempotentes. Notons qu'en pratique, l'algorithme MCL converge presque toujours sans dépasser les 20 premières itérations du processus [Van Dongen \[2000\]](#), [Macropol \[2009\]](#).

#### 4.2.7 Interprétation des clusters

Dans le but d'interpréter les clusters du graphe en entrée, l'ensemble de sommets est divisé en deux types : les attracteurs, qui forment des clusters en attirant d'autres sommets, et les sommets simples attirés par les attracteurs et constituant les différents clusters du graphe. Les attracteurs ont au moins une valeur de flux positive sur la ligne correspondante dans la matrice de convergence. Chaque attracteur attire les sommets possédant des valeurs non-nulles sur sa ligne dans la matrice de convergence [Van Dongen \[2000\]](#), [Macropol \[2009\]](#).

### 4.3 ARCHITECTURE DU PROTOCOLE MCL-BCRP

Le protocole MCL-BCRP [Taieb Brahim et al. \[2021\]](#) a pour but de conserver l'énergie tout en assurant la couverture du réseau par l'ensemble des CHs, ce qui représente un problème critique pour la prolongation de la durée de vie d'un réseau de capteurs. Une approche hybride est utilisée pour la formation des clusters et la sélection de leur CHs. La formation des clusters, basée sur l'algorithme MCL, est un processus dynamique et centralisé. En utilisant les distances entre les capteurs, l'algorithme MCL regroupe les capteurs les plus proches en clusters au moyen d'un seuil fixe dépendant de la répartition des capteurs sur le réseau. La sélection du CH est adaptative et distribuée utilisant deux paramètres du réseau : l'énergie résiduelle et sa proximité à la fois de la station de base et du centre de gravité du cluster. Les capteurs les plus proches à la fois de la station de base et des centres de gravité avec les énergies résiduelles les plus élevées dans le réseau sont sélectionnés comme cluster-heads. La proximité des CHs de la station de base conduit à une réduction de la consommation d'énergie au niveau des CHs lors des communications avec la station de base, alors que la proximité des centres de gravité per-

met une préservation énergétique à l'intérieur des clusters. Le protocole MCL-BCRP se compose de deux étapes principales :

- Une étape centralisée de configuration du réseau qui se répète plusieurs fois pendant la durée de vie du réseau. Cette configuration est basée sur une clustérisation adaptative et dynamique.
- Une étape de communication distribuée entre les capteurs du réseau et la station de base. Le protocole est conçu sous forme de rounds de communications répétitives. Cependant, certains rounds sont réservés à la reconfiguration du réseau.

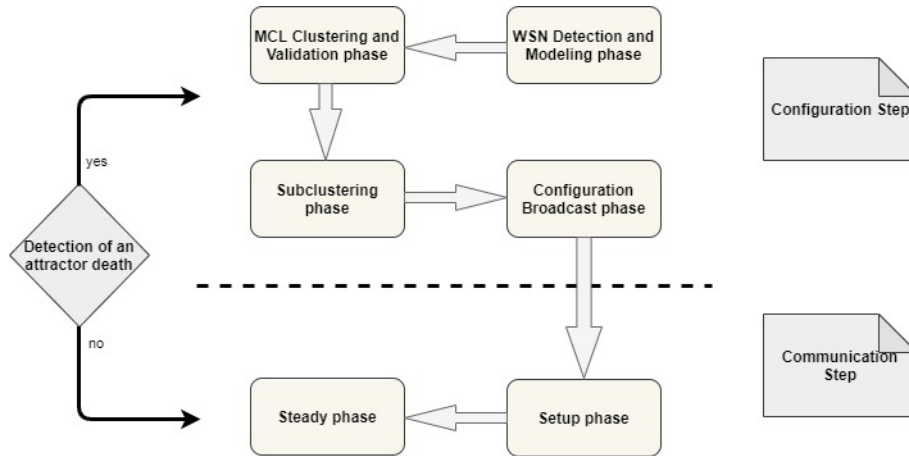


FIGURE 4.2 – Architecture du protocole MCL-BCRP.

## 4.4 ÉTAPE DE CONFIGURATION

Lors de l'étape de configuration, la station de base configure le réseau de capteurs sans fil pour l'organiser de manière hiérarchique. Cette étape se compose de 4 phases commençant par la détection du réseau et se terminant par la diffusion du message de configuration à tous les capteurs du réseau.

### 4.4.1 Phase de détection et de modélisation du RCSF

Tout d'abord, la station de base reçoit les coordonnées géographiques de tous les capteurs du réseau à l'aide du système GPS. Nous soulignons ici, qu'après cette première configuration du réseau, le GPS ne sera plus utilisé par les capteurs du réseau. Par la suite, la station de base procède au nommage des capteurs au moyen des coordonnées géographiques afin de les regrouper en clusters. Ensuite, la station de base calcule les distances euclidiennes entre différents capteurs du réseau. Ces distances sont utilisées pour générer la matrice associée au réseau de capteurs. La station de base détermine une distance seuil intimement liée à la dispersion des capteurs sur la zone d'intérêt. La distance seuil est définie comme un rapport entre la distance moyenne du réseau et un entier positif  $k$  :

$$dis_{threshold} = \frac{dis_{mean}}{k} \quad (4.4)$$

où,  $dis_{mean} = (dis_{max} + dis_{min})/2$ , tel que  $dis_{max}$  et  $dis_{min}$  sont respectivement les distances euclidiennes maximales et minimales entre les capteurs du réseau. Le résultat de cette phase consiste à générer la matrice associée  $M$  de dimension  $n \times n$ . Si la distance entre deux capteurs  $i$  et  $j$  est inférieure à la distance seuil, alors nous supposons que les deux capteurs appartiennent au même voisinage, c'est-à-dire qu'un capteur peut communiquer avec l'autre avec une faible dissipation d'énergie. Dans ce contexte, nous soulignons que le choix de la distance seuil est crucial pour obtenir une faible dissipation d'énergie intra-cluster lors des communications entre les cluster-heads et leurs membres. Plus formellement, la matrice  $M$  est définie comme suit :

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } distance_{ij} \leq dis_{threshold}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.5)$$

où,  $i, j = 1..N$ .

#### 4.4.2 Phase de clustérisation et validation

La tâche principale de la deuxième phase consiste à organiser le réseau sous forme de clusters au moyen de l'algorithme MCL. À cet effet, la station de base fournit la matrice  $M$  associée au réseau comme entrée du processus MCL qui génèrera les différents clusters formant le réseau en fonction de la dispersion de ses capteurs sur la zone de captage. Les simulations montrent que le paramétrage  $e_{(i)} = r_{(i)} = 2$  fournit une clustérisation rapide du réseau où la convergence du processus MCL est d'environ 10 à 20 itérations pour les réseaux avec 100 capteurs. Dans ce qui suit, tous les exemples des RCSFs sont supposés être des réseaux avec 100 capteurs sur une zone de captage de 100 m  $\times$  100 m.

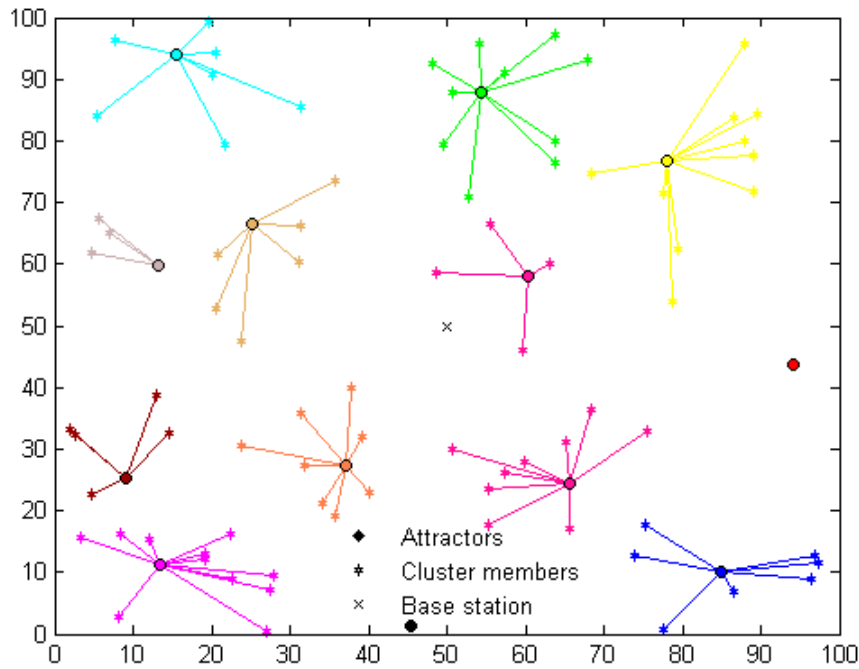


FIGURE 4.3 – Clustérisation MCL avec une convergence de 11 itérations et les paramètres  $e_{(i)} = r_{(i)} = 2$  et  $k = 4$ .

En général, le processus MCL peut fournir des clusters qui se chevauchent dans des cas très particuliers de symétrie de réseau. La deuxième phase remédie à ce problème. Cependant, cette symétrie est rarement vérifiée par un réseau de capteurs en pratique. En fait, la station de base résout ce chevauchement en attribuant les capteurs en question à des clusters avec l'attracteur le plus proche. Dans la même phase, la station de base vérifie si les clusters ont une taille raisonnable par rapport à celui du réseau. Le protocole rejette tous les clusters dont la taille est inférieure à  $x\%$  de la taille du réseau. En pratique, ce pourcentage est fixé à 5%. Cette exigence évite l'apparition de minuscules clusters qui épuisent rapidement les énergies de leurs membres et tendent à mourir de manière précoce par rapport aux autres clusters. Par exemple, les singletons sont des clusters qui ne contiennent qu'un seul capteur jouant le rôle de CH à chaque round. Ce capteur s'épuise rapidement en raison de transmissions de données répétitives vers la station de base. La station de base utilise la même stratégie de résolution pour les clusters minuscules que les clusters qui se chevauchent, en attribuant les capteurs aux différents clusters voisins dont l'attracteur est le plus proche.

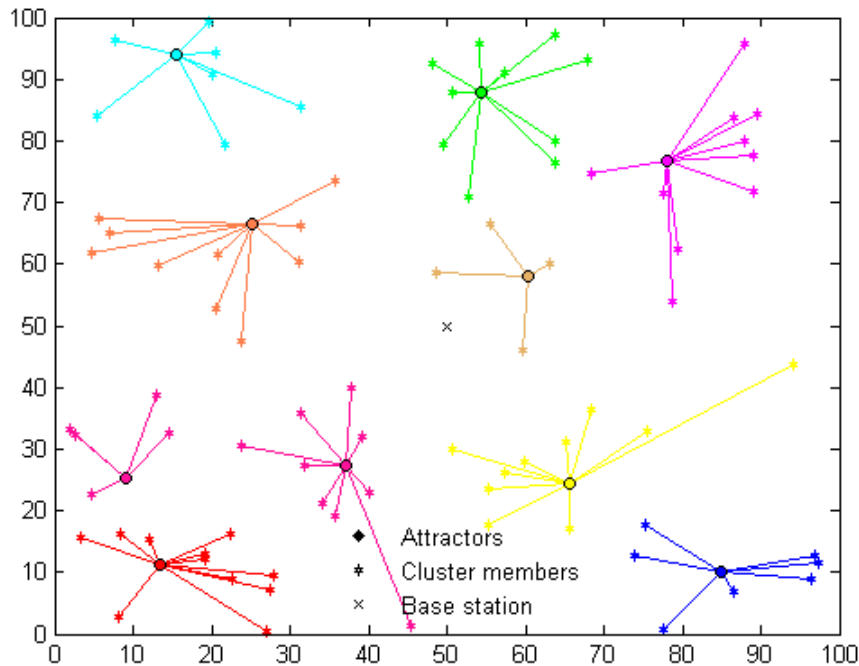


FIGURE 4.4 – Clustérisation MCL validée après élimination des clusters minuscules.

#### 4.4.3 Phase de sous-clustérisation

En fonction des phénomènes étudiés, de la densité des capteurs de certaines zones et des types de données à capturer, les capteurs à l'intérieur d'un même cluster peuvent souvent capturer des données très corrélées. Il est judicieux, dans ce cas, de sélectionner un capteur représentatif de ces capteurs qui est le seul autorisé à envoyer ses données au cluster-head. Cette restriction d'envoi économise l'énergie dissipée à l'intérieur des clusters et soulage les cluster-heads des agrégations de données redondantes. De plus, cette fonctionnalité introduit un niveau hiérarchique supplémentaire à l'intérieur des différents clusters du réseau. La mise en œuvre nécessite la définition de la notion de rayon de captage. Un rayon de captage est défini comme étant la distance maximale qui sépare les capteurs au sein du même cluster capturant des données identiques. Ce paramètre varie en fonction de l'application ciblée. Par exemple, le rayon de captage de la température ambiante est plus large que celui utilisé pour la détection d'un incendie dans une forêt. Pendant cette phase, la station de base balaye tous les clusters et forme d'éventuels sous-clusters regroupant des capteurs appartenant au même rayon de captage.

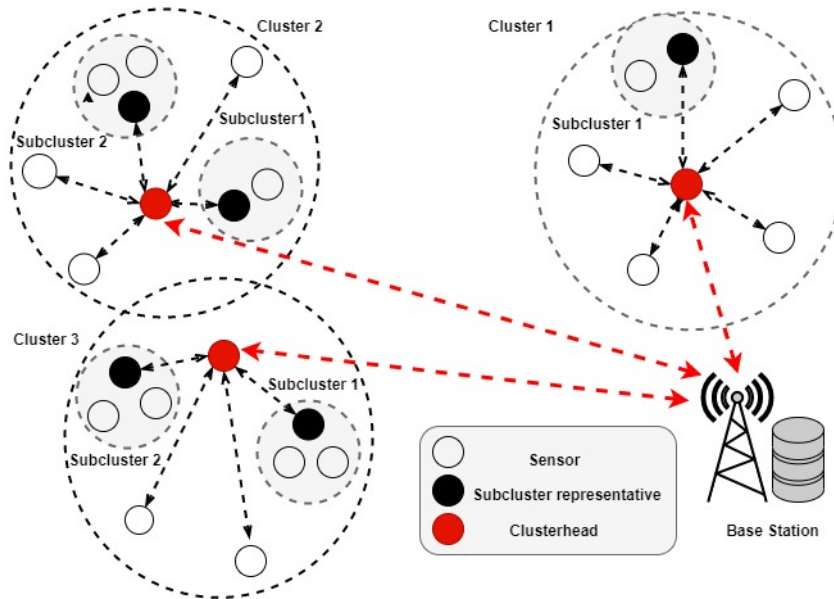


FIGURE 4.5 – Exemple d’architecture d’un RSCF avec sous-clusters.

#### 4.4.4 Phase de diffusion de la configuration

En fin de cette étape de configuration, la station de base estime, pour chaque cluster, l’énergie minimale à partir de laquelle un capteur doit déclarer sa mort à tous les membres appartenant au même cluster. Selon l’Équation 1.2, la station de base calcule l’énergie résiduelle suffisante qui permet d’envoyer une annonce de mort entre les capteurs les plus éloignés de tous les clusters du réseau. De plus, la station de base calcule les centres de gravité de tous les clusters et trie les membres de ce derniers du plus proche à la fois du centre de gravité et la station de base au plus éloigné. L’étape de configuration est finalisée par la diffusion d’un message de configuration contenant l’identification des capteurs, les clusters triés avec leurs sous-clusters éventuels ainsi que des seuils d’énergie correspondant aux annonces de mort par cluster. Chaque capteur ne conserve que les informations relatives à son cluster, d’autant plus qu’il possède une mémoire limitée. Pendant l’étape de communication, chaque capteur maintient une table de cluster triée, contenant les membres du cluster avec leurs énergies résiduelles ainsi que le seuil d’énergie pour l’annonce de mort relatif au cluster.

### 4.5 ÉTAPE DE COMMUNICATION

Dans un réseau de capteurs sans fil, il existe deux niveaux de communication : les communications intra-cluster entre les membres du cluster et les cluster-heads en utilisant la technique TDMA et les communications inter-cluster, entre les cluster-heads et la station de base en utilisant la technique CDMA. L’accès multiple par répartition du temps (TDMA) et l’accès multiple par répartition du code (CDMA) sont des protocoles standard de contrôle d’accès au support Turner et al. [2013]. En utilisant la technique TDMA, le capteur émet durant des tranches de temps (slots)

allouées par le cluster-head. Cependant, avec la technique CDMA, plusieurs CHs peuvent envoyer des données simultanément sur un seul canal de communication. De cette manière, plusieurs cluster-heads peuvent partager une bande de fréquences [Selmic et al. \[2016\]](#). L'étape de communication est conçue pour être exécutée comme des rounds répétitifs d'une durée fixe. Chaque round de communication est constitué de deux phases :

#### 4.5.1 Phase de configuration

Cette phase comporte trois tâches préliminaires permettant un bon déroulement de la phase de communication.

1. **Diffusion de l'énergie résiduelle** : En utilisant l'ordonnancement TDMA du round précédent, chaque capteur diffuse son énergie résiduelle ou annonce sa mort si le niveau de sa batterie a atteint le seuil fixé par la station de base lors de l'étape de configuration. Ensuite, chaque capteur met à jour les énergies résiduelles dans sa table de cluster et supprime les membres déclarés comme étant morts.
2. **Sélection des cluster-heads** : La sélection des CHs est la tâche principale de la phase de configuration. En fait, comme le calcul est beaucoup moins coûteux que la communication intra-cluster, tous les membres du cluster sélectionnent localement le même cluster-head du round courant. Nous soulignons à ce niveau, qu'il s'agit d'une simple sélection de cluster-heads plutôt qu'une élection de cluster-heads nécessitant des messages de contrôle (overheads) supplémentaires à l'intérieur des clusters. En vue de déterminer le CH courant, chaque membre sélectionne le capteur le plus proche de la station de base et du centre de gravité du cluster, parmi tous les candidats ayant les énergies résiduelles les plus élevées. Cette sélection des CHs joue un rôle crucial dans la gestion de la consommation d'énergie. En effet, ce choix des cluster-heads est justifié par l'atténuation de la consommation d'énergie pour les communications intra-cluster et les transmissions entre les CHs et la station de base.
3. **Ordonnancement TDMA** : Le CH sélectionné détermine une nouvelle planification TDMA pour le round courant en tenant compte des morts signalées au début du round. Cet ordonnancement TDMA sera utilisé pendant la phase de communication par tous les membres du cluster durant le round courant.

#### 4.5.2 Phase stable

Le but ultime d'un réseau de capteurs sans fil est la gestion des communications de données. Cette phase assure la diffusion des données capturées par tous les capteurs du réseau vers la station de base via des cluster-heads sélectionnés.

1. **Membres des clusters** : les membres du cluster peuvent appartenir à des sous-clusters comme ils peuvent ne pas l'être. Les membres appartenant à des sous-clusters sélectionnent un représentant avec la plus faible énergie résiduelle pour envoyer des données au CH. Les



principaux avantages de cette limitation d'envoi sont l'équilibrage de la consommation et la conservation de l'énergie à l'intérieur des sous-clusters. Les membres n'appartenant pas à des sous-clusters envoient automatiquement leurs données au CH pendant les slots temporaires alloués.

2. **Cluster-heads (CHs)** : les CHs reçoivent les données des membres du cluster, effectuent une agrégation de données et les transmettent à la station de base tout en signalant les éventuelles morts des capteurs durant le round courant.
3. **Station de base** : La station de base reçoit les données de différents cluster-heads du réseau avec une surveillance continue de la mort des attracteurs. Suite à la détection de la mort de l'un des attracteurs, la station de base diffuse un message de contrôle annonçant une nouvelle reconfiguration du réseau. Par la suite, elle exécute l'algorithme MCL qui fournit une nouvelle configuration du réseau. La communication dans le réseau restera suspendue jusqu'à la diffusion de la nouvelle configuration. Notons à ce niveau que l'étape de reconfiguration est identique à celle de la configuration mais sans la phase de détection et de modélisation du RCSF.

## 4.6 CONCLUSION

Lors de ce chapitre, nous avons présenté un nouveau protocole hiérarchique MCL-BCRP. Le protocole MCL-BCRP a pour but principal la conservation de l'énergie qui représente un problème critique pour la prolongation de la durée de vie des RCSFs. Le protocole vise également à assurer une bonne couverture de la zone d'intérêt par l'ensemble des cluster-heads du réseau.

Le protocole MCL-BCRP se base sur une approche hybride pour la formation des clusters et la sélection des cluster-heads. La formation des clusters, utilisant l'algorithme MCL, est un processus centralisé et dynamique. En utilisant les distances entre les capteurs, l'algorithme MCL regroupe les plus proches en clusters en se basant sur un seuil fixé en fonction de la dispersion de ces derniers sur la zone de captage.

Le processus de sélection des CHs est adaptatif et distribué. Cette sélection adaptative repose sur deux paramètres importants du réseau, à savoir, l'énergie résiduelle des capteurs et leurs proximités de la station de base et des centres de gravité des différents clusters. Les capteurs qui sont à la fois les plus proches de la station de base ainsi que les centres de gravité des clusters avec les plus hautes énergies résiduelles sont sélectionnés comme cluster-heads. Cette sélection des CHs basée sur la minimisation des distances et nécessitant peu de messages de contrôle (peu d'overheads) conduit à une préservation significative d'énergie lors des communications intra-clusters et les transmissions entre les CHs et la station de base.

La transmission sélective des membres des clusters vers leur CHs réduit considérablement la consommation énergétique à l'intérieur des clusters. En effet, les membres appartenant au même rayon de captage ne transmettent pas tous les données observées vers les CHs, seulement un représentant de ces derniers est autorisé à transmettre. Cette restriction d'envoi vers les CHs est justifiée par la très forte corrélation des données capturées par les membres appartenant au même rayon de captage.

# RÉSULTATS DES SIMULATIONS & DISCUSSIONS

# 5

## SOMMAIRE

---

5.1	INTRODUCTION . . . . .	88
5.2	PARAMÈTRES DE SIMULATION . . . . .	88
5.2.1	Modèle des RCSFs . . . . .	88
5.2.2	Modèle énergétique . . . . .	89
5.2.3	Paramètres de base des simulations . . . . .	89
5.2.4	Protocoles de simulation . . . . .	90
5.3	CARACTÉRISTIQUES DU CLUSTERING MCL . . . . .	92
5.4	GRANULARITÉ DU CLUSTERING MCL . . . . .	92
5.5	COUVERTURE DES RCSFs . . . . .	97
5.6	CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RCSFs . . . . .	99
5.7	DURÉE DE VIE DES RCSFs . . . . .	101
5.8	CONCLUSION . . . . .	103

---

## 5.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente une synthèse des résultats obtenus à partir des simulations effectuées sur le protocole MCL-BCRP et d'autres protocoles de référence issus de la littérature des réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons par étudier les caractéristiques et la granularité du clustering MCL permettant d'effectuer des configurations hors ligne de la topologie du RCSF. Nous enchainons avec une discussion approfondie des performances du protocole MCL-BCRP comparées au protocole LEACH en termes de couverture des CHs de la zone d'intérêt, ainsi qu'aux protocoles TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED en termes de consommation d'énergie et de durée de vie des RCSFs.

## 5.2 PARAMÈTRES DE SIMULATION

### 5.2.1 Modèle des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil sont supposés être constitués de  $n$  capteurs équipés d'un module GPS. Il est bien connu que le module GPS épuise rapidement l'énergie des capteurs [Akyildiz and Vuran \[2010\]](#). Cette contrainte ne représente pas un réel problème puisque le GPS n'est utilisé

qu'une seule fois lors de la première étape de configuration du réseau. Les capteurs sont dispersés aléatoirement dans une région de captage carrée de  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ . La station de base est située au centre du réseau de capteurs. De plus, tous les capteurs du réseau sont homogènes et soumis à des limitations énergétiques. Les capteurs surveillent l'environnement avec la même fréquence et ont en permanence des données à envoyer à la station de base. De plus, la puissance de traitement des données est très faible par rapport aux puissances d'émission et de réception des données. Par conséquent, la puissance de traitement des données est négligée dans la dissipation d'énergie des capteurs à l'exception de l'agrégation des données au niveau des cluster-heads. L'ensemble des simulations est exécuté sous l'environnement Matlab, sur des RCSFs de 100 capteurs homogènes avec la même énergie initiale.

### 5.2.2 Modèle énergétique

Le modèle énergétique utilisé lors des simulations du protocole MCL-BCRP est identique aux modèles implémentés au niveau des protocoles choisis pour la simulation. Ce modèle est une version légèrement modifiée du modèle énergétique de base en imposant une distance seuil  $d_0$  à partir de laquelle l'amplification du module radio sera plus importante lors de l'émission des données. Cette distance seuil est définie par :

$$d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{amp}}} \quad (5.1)$$

tel que  $E_{fs}$  et  $E_{amp}$  sont les consommations d'énergie par bit lors de l'émission de l'amplificateur de puissance. Par conséquent, l'Équation 1.2 qui définit l'énergie de l'émission d'un message de  $k$  bits est mise à jour par l'équation suivante :

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} E_{tx-elec} * k + E_{fs} * k * d^2 & \text{si } d < d_0 \\ E_{tx-elec} * k + E_{amp} * k * d^4 & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (5.2)$$

### 5.2.3 Paramètres de base des simulations

Les simulations ont été exécutées sous l'environnement Matlab. L'exécution de ces simulations s'est déroulée sur une batterie de test contenant un échantillon de 100 RCSFs générés aléatoirement. Les paramètres de base des simulations sont présentés dans le Tableau 5.1 :

TABLE 5.1 – Paramètres de base des simulations

Paramètre	Valeur
Zone de captage	$100 \times 100$
Position de la BS	$50 \times 50$
Nombre de capteurs	100
Taille des messages de données	4000 bit
Seuil des clusters rejetés (miniscules) $x\%$	5%
Paramètre de distance seuil $k$	4
Puissance d'expansion $e$	2
Puissance d'inflation $r$	2
Rayon de captage	$2m$
Énergie initiale $E_0$	$0.5 J$
Énergie électrique/bit $E_{elec}$	$50nJ/m^2$
Énergie d'agrégation des données	$5 \times 10^{-9} J$
Énergie d'amplification $E_{amp}$	$0.0013pJ/bit/m^2$
Énergie d'amplification $E_{fs}$	$10pJ/bit/m^4$

#### 5.2.4 Protocoles de simulation

Nous avons choisi les protocoles les plus cités dans la littérature afin d'avoir des repères sur les performances du protocole proposé MCL-BCRP. Il s'agit des protocoles LEACH [Heinzelman et al. \[2000\]](#), PEGASIS [Lindsey et al. \[2001\]](#), [Lindsey and Raghavendra \[2002\]](#), HEED [Younis and Fahmy \[2004\]](#) et TEEN [Manjeshwar and Agrawal \[2001\]](#). La disponibilité des codes des protocoles choisis dans l'environnement Matlab, nous a énormément facilité la tâche de simulation. Nous avons injecté les mêmes scripts de simulation dans les différents protocoles avant de les simuler sur une batterie de test de 100 RCSFs. Le tableau 5.2 présente une comparaison conceptuelle entre le protocole MCL-BCRP et les protocoles choisis.

TABLE 5.2 – Comparaison conceptuelle entre les protocoles de simulation.

Protocol	CH Selection						Cluster Formation				
	Algorithm (D : distributed, C : centralized)	Scenario (R : random, A: Adaptive)	CH Election : E, CH Selection : S	Overhead	Based on Residual energy (R) , Based on Location (L), Based on Neighbor (N)	Algorithm (D : distributed, C : centralized)	Frequency (ER : each round, AD : each attractor death)	Intra-cluster topology	Communication CH-BS		
LEACH	D	R	E	Low	-	D	ER	Single hop	Direct link	Direct link	Direct link
HEED	D	A	E	High	R and N	D	ER	Multi hop	Direct link	Direct link	Direct link
TEEN	D	A	E	High	-	D	ER	Multi hop	Direct link	Direct link	Direct link
PEGASIS	D	A	S	-	-	D	ER	Single hop	Direct link	Direct link	Direct link
MCL-BCRP	D	A	S	Low	R and L	C	AD	Single hop	Direct link	Direct link	Direct link

### 5.3 CARACTÉRISTIQUES DU CLUSTERING MCL

Le processus de clustering du protocole MCL-BCRP est déterministe, dynamique et basé sur les distances entre les capteurs. Il est facile de constater que l'algorithme MCL est déterministe. En effet, MCL fournit la même topologie pour le même déploiement réseau et les mêmes paramètres de configuration. Ce déterminisme est dû au fait que l'alternance des opérateurs d'expansion et d'inflation produit une seule matrice de convergence à partir d'une matrice de transition fournie en entrée. L'utilisation du clustering dynamique pour les réseaux de capteurs est inévitable afin d'équilibrer la consommation d'énergie entre les différentes régions du réseau. Cet équilibre est crucial pour maintenir le plus de régions en vie le plus longtemps possible. Les simulations montrent que toute mort d'attracteur entraîne la migration des capteurs du cluster en question vers les clusters voisins. Cependant, dans certains cas, la mort de l'un des attracteurs peut même affecter la stabilité des clusters éloignés. Contrairement à la plupart des algorithmes de clustering dynamique de la littérature, le processus de formation de cluster n'est pas effectué à chaque round. En fait, la reconfiguration n'est redemandée qu'après la détection de la mort d'un attracteur évitant la rupture de la détection à chaque round.

### 5.4 GRANULARITÉ DU CLUSTERING MCL

La granularité du clustering MCL est très sensible à la variation des paramètres  $r$  et  $k$  qui représentent respectivement la puissance d'inflation et le paramètre de distance seuil. De plus, la puissance de l'inflation joue un rôle crucial dans la convergence de l'algorithme MCL. Il a été prouvé dans [Van Dongen \[2000; 1998\]](#) que lorsque  $r$  est strictement compris entre 0 et 1, l'algorithme ne converge pas, ce qui est dû à la non-homogénéité des matrices stochastiques obtenues par l'algorithme MCL. Cependant, pour des valeurs strictement supérieures à 1, le nombre de clusters croît en fonction de la croissance de la puissance d'inflation  $r$ . Ce phénomène est dû au fait que des valeurs élevées de  $r$  impliquent un renforcement du flux dans les matrices stochastiques favorisant une augmentation du nombre de clusters.

Considérons le réseau de capteurs sans fil illustré à la Figure 4.3. L'algorithme MCL fournit différents clusterings pour les valeurs  $r = 2,5$  et  $r = 1,5$  avec le paramétrage  $e = 2$  et  $k = 4$ .

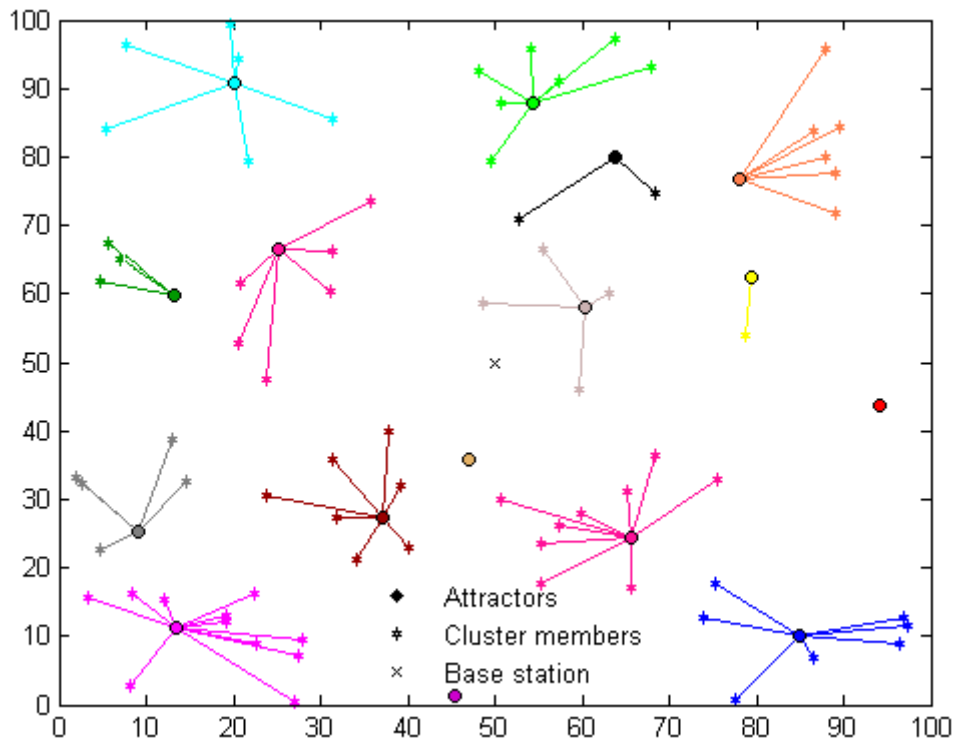


FIGURE 5.1 – Différents clusterings avec différentes valeurs de la puissance d'inflation  $r$  :  
 (a) Premier Clustering avec  $r = 2.5$  (16 clusters)

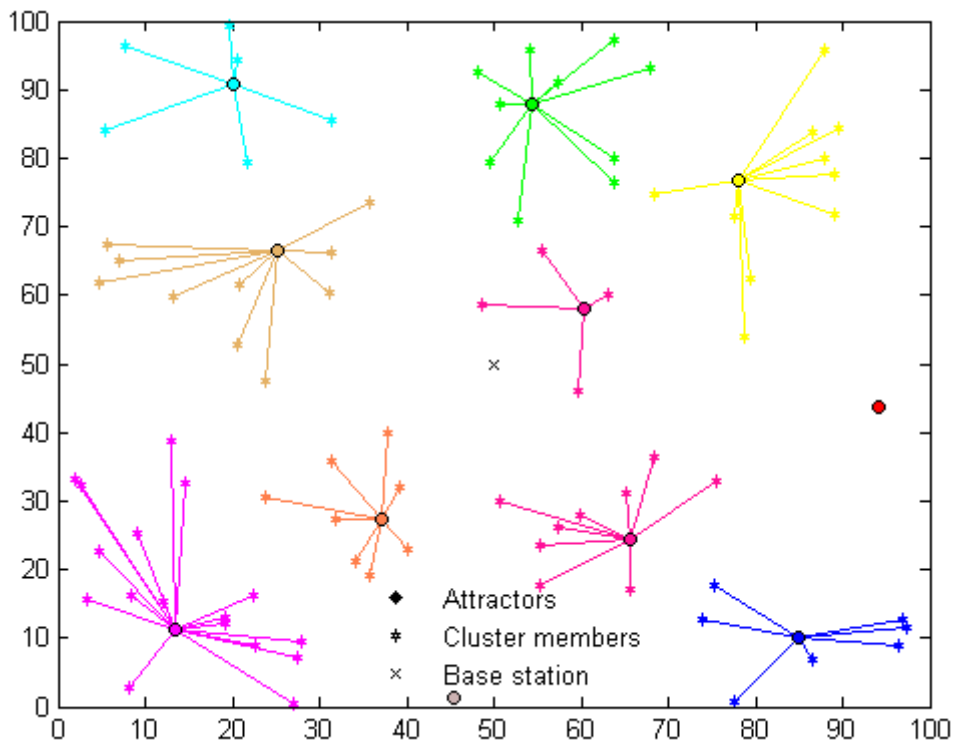


FIGURE 5.2 – Différents clusterings avec différentes valeurs de la puissance d'inflation  $r$  :  
 (b) Deuxième Clustering avec  $r = 1.5$  (11 clusters)



De même, les simulations ont également montré que le nombre de clusters augmente avec la croissance du paramètre  $k$ . En fait, les valeurs élevées de  $k$  induisent de petites distances seuil définissant des clusters dans le réseau. Par conséquent, lorsque  $k$  tend vers des valeurs élevées, l'algorithme de clustering produit un grand nombre de clusters.

Il est important de noter à partir des discussions précédentes que les valeurs élevées des deux paramètres  $r$  et  $k$  doivent être évitées en pratique. En effet, dans ces cas, l'algorithme de clustering tend à fournir un grand nombre de petits clusters provoquant la mort prématurée du réseau. Les Figures 5.3 et 5.4 montrent deux clusterings distincts du réseau de capteurs sans fil illustré sur la Figure 4.3 pour les valeurs  $k = 3$  et  $k = 5$  avec le paramétrage  $e = r = 2$ .

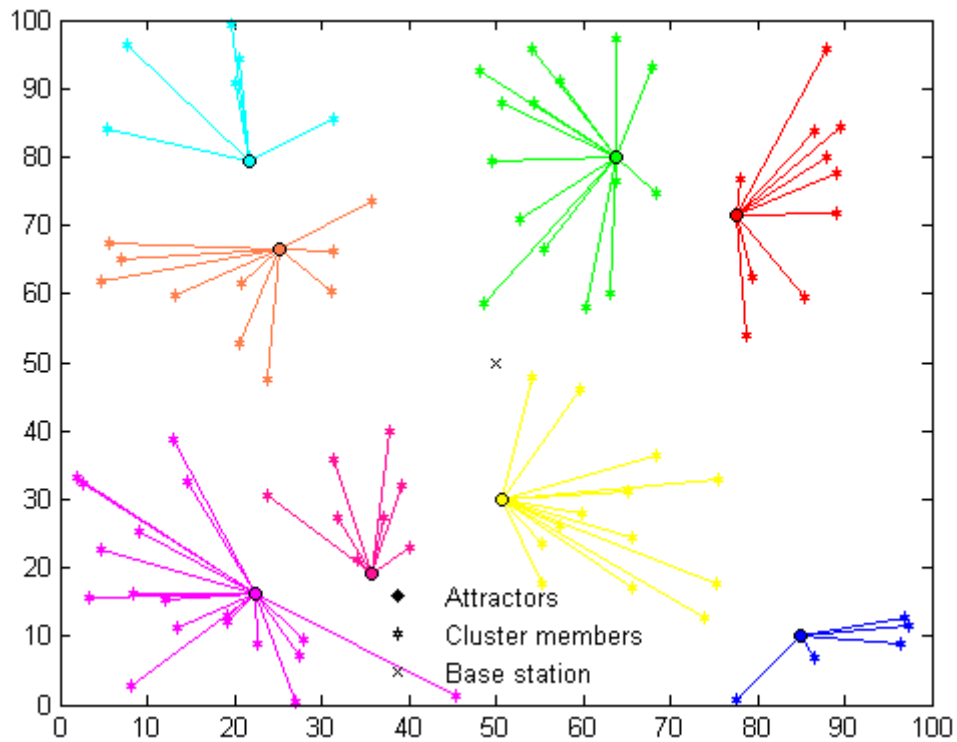


FIGURE 5.3 – Différents clusterings avec différentes valeurs du paramètre de distance seuil  $k$  : (a) Premier clustering avec  $k = 3$  (8 clusters)

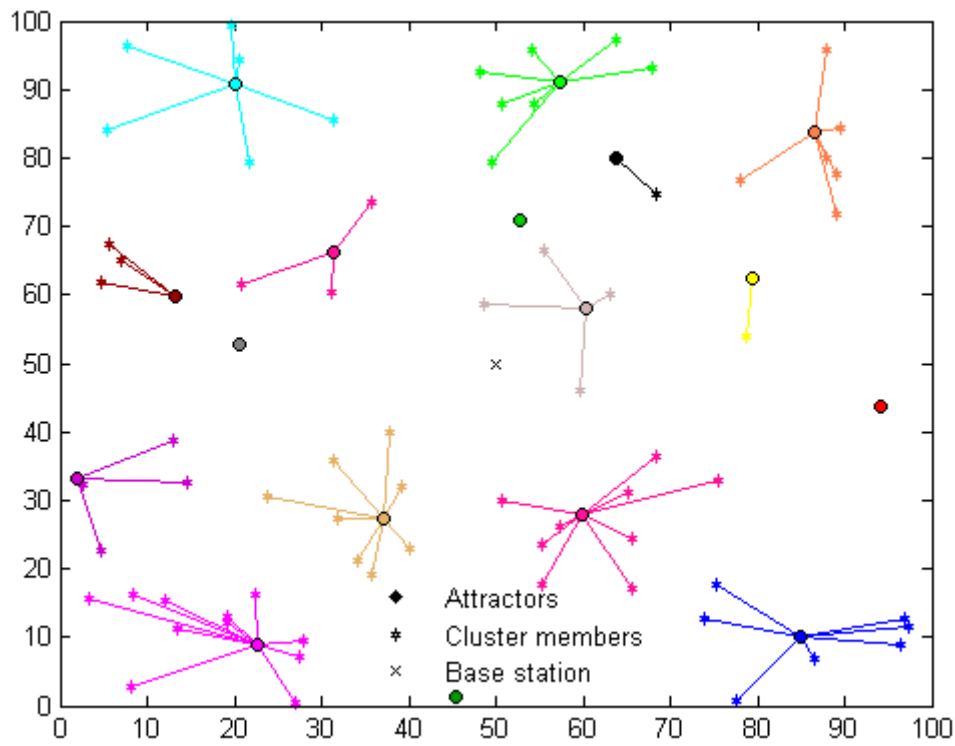


FIGURE 5.4 – Différents clusterings avec différentes valeurs du paramètre de distance seuil  $k$  : (b) Deuxième clustering avec  $k = 5$  (17 clusters)

Les Figures 5.5, 5.6 illustrent la variation de la granularité du clustering en fonction de la puissance de l'inflation  $r$  et le paramètre de distance seuil  $k$ .

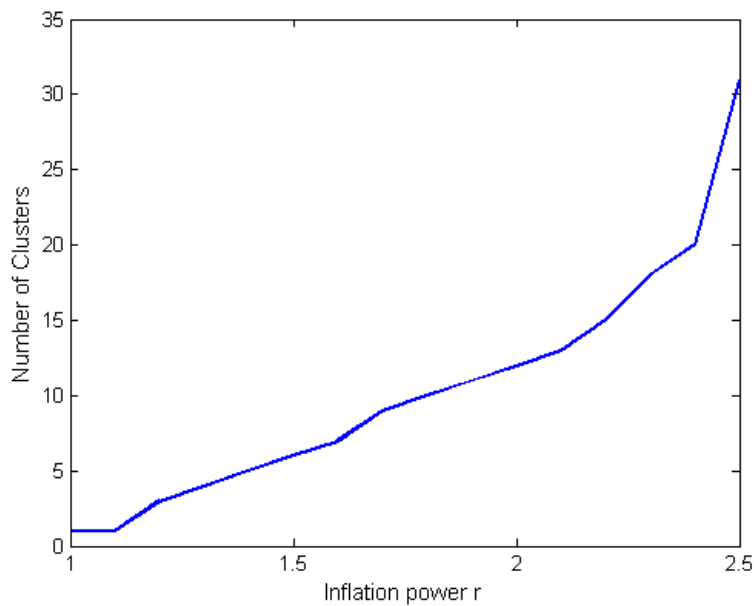


FIGURE 5.5 – Variation de la granularité du clustering MCL en fonction de la puissance d'inflation  $r$  (avec les valeurs  $e = k = 2$ )

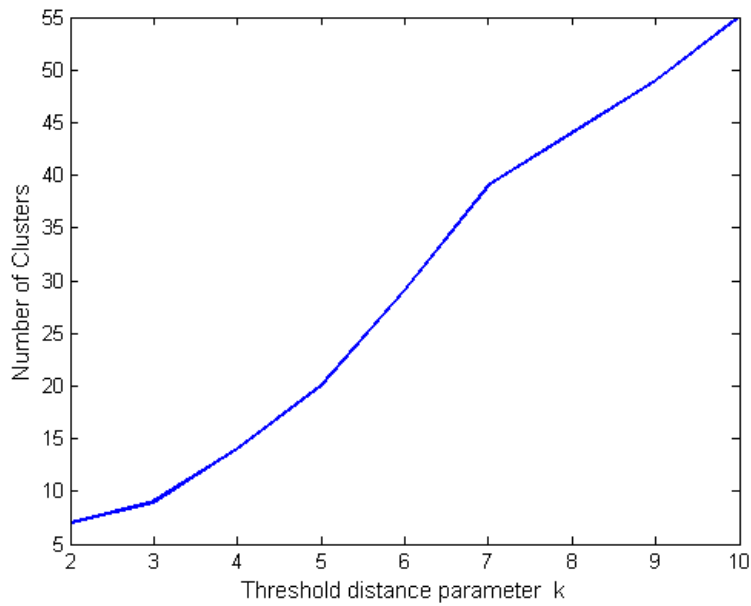


FIGURE 5.6 – Variation de la granularité du clustering MCL en fonction du paramètre de distance seuil  $k$  (avec les valeurs  $e = r = 2$ )

La Figure 5.7 montre la croissance de la granularité du clustering en fonction de la croissance des valeurs des paramètres  $r$  et  $k$  :

Granularity according to the power inflation $r$		Granularity according to the threshold distance $k$	
$r$	Number of clusters	$k$	Number of clusters
1	1	2	7
1.3	4	4	14
1.6	7	5	20
1.9	11	7	39
2.2	15	9	49
2.5	31	10	55

FIGURE 5.7 – Granularité du clustering MCL en fonction de la puissance d’inflation et le paramètre de distance seuil.

Grâce au caractère déterministe de l’algorithme MCL, le protocole offre la possibilité d’effectuer une configuration hors ligne du RCSF. Ce paramétrage hors ligne permet de choisir la meilleure configuration en fonction des objectifs de l’application utilisant le protocole en termes de durée de vie, nombre et taille de clusters, couverture, etc.

## 5.5 COUVERTURE DES RCSFs

L'un des principaux avantages du protocole MCL-BCRP est d'assurer une couverture raisonnable de la zone de captage par l'ensemble des cluster-heads d'un RCSF. Cet objectif est contraint par la distribution aléatoire des capteurs pour certaines applications et la granularité produite par l'algorithme de clustering. Cependant, les applications auxquelles le protocole est destiné peuvent configurer hors ligne le meilleur paramétrage pour obtenir la couverture souhaitée. La couverture des CHs a été étudiée et comparée avec le protocole LEACH. Le choix de la métrique appropriée a été orienté vers le test de dispersion de Poisson. Ce test de dispersion, développé dans Fisher et al. [1922], est l'un des tests les plus courants pour déterminer si un ensemble de données suit une distribution de Poisson. Le test de dispersion de Poisson est défini comme Doray and Huard [2001] :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{\bar{X}} \quad (5.3)$$

où  $\bar{X}$  et  $N$  dénotent respectivement la moyenne des données et la taille de l'ensemble de données. En termes de couverture, ce test de dispersion permet de mesurer l'uniformité de la distribution des CHs sur la zone de captage. Nous pouvons facilement constater à partir de la formule du test de Poisson que lorsque la distribution des CHs est importante, la valeur du test de dispersion est plus élevée. Les simulations montrent qu'une meilleure couverture des CHs est atteinte avec le protocole MCL-BCRP par rapport à LEACH (voir la Figure 5.8).

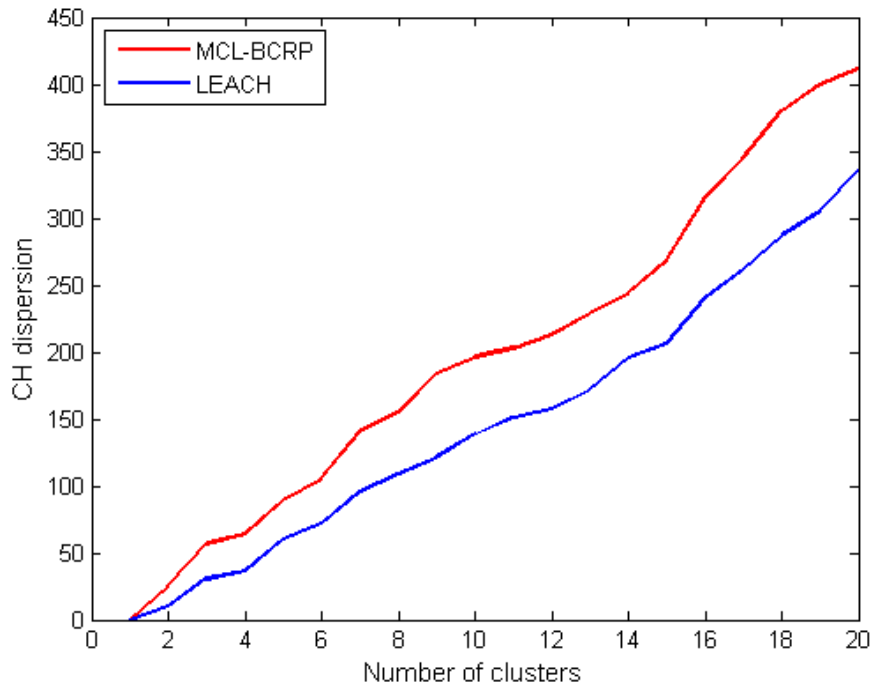


FIGURE 5.8 – Test de dispersion de Poisson des cluster-heads avec les protocoles LEACH et MCL-BCRP.

Le Figure 5.9 montre en détails l'écart observé de la distribution des CHs sur la zone de captage entre les protocoles MCL-BCRP et LEACH.

Number of Clusters	LEACH CH dispersion	MCL-BCRP CH dispersion
2	10.3346	25.3219
5	60.2328	89.7151
8	108.6224	155.0672
11	151.0075	202.8699
14	195.5916	243.9656
17	261.2589	345.2365
20	336.1597	412.1562

FIGURE 5.9 – Comparaison entre la dispersion de poisson des CHs entre les protocoles LEACH et MCL-BCRP.

Les résultats obtenus s'expliquent par la sélection aléatoire des CHs dans le protocole LEACH qui ne garantit pas une couverture totale du réseau. De plus, la sélection aléatoire peut entraîner une concentration des CHs dans certaines zones du réseau. Cependant, le protocole MCL-BCRP crée des clusters en fonction de la distribution des capteurs sur la zone d'intérêt, induisant ainsi une meilleure dispersion des CHs (voir les Figures 5.9, 5.10 et 5.11).

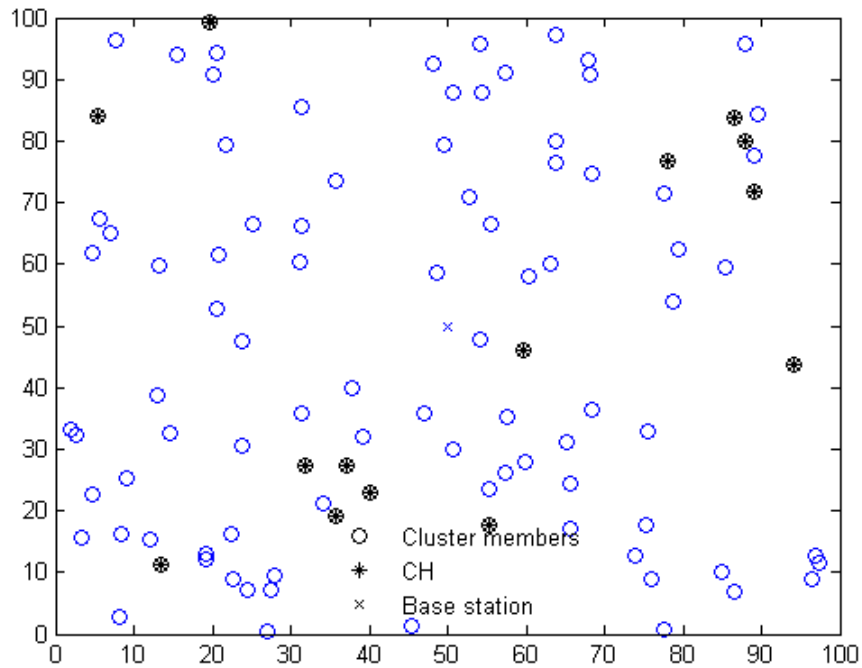


FIGURE 5.10 – Dispersion aléatoire des CHs avec le protocole LEACH.

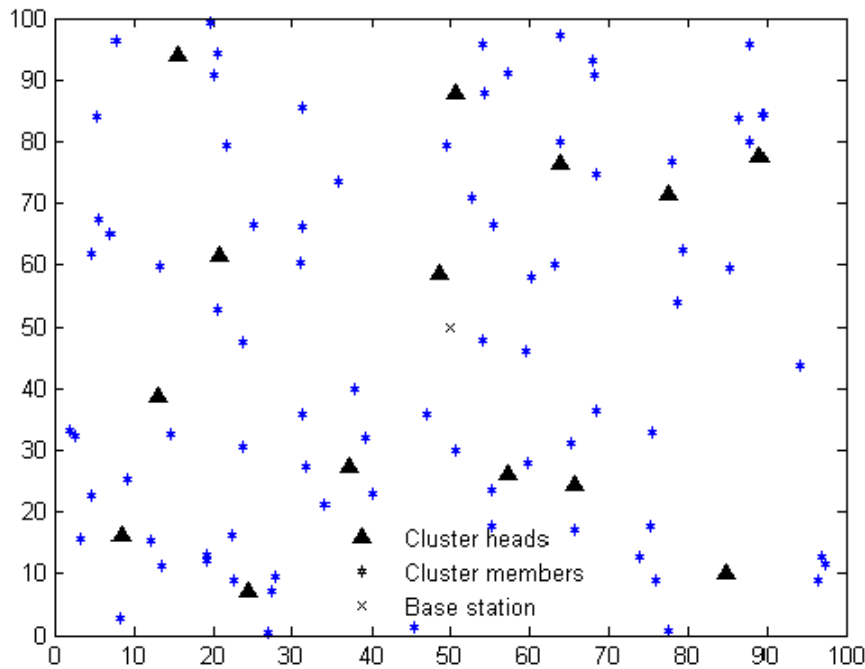


FIGURE 5.11 – Dispersion uniforme des CHs avec le protocole MCL-BCRP.

## 5.6 CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RCSFs

Les résultats de simulation montrent que le protocole MCL-BCRP offre une meilleure consommation d'énergie par rapport aux autres protocoles TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED.

Dans le but de simplifier la compréhension du tableau illustré sur la Figure 5.13, nous avons choisi de colorer des lignes correspondant à 50% et 100% de la consommation énergétique initiale. Chaque protocole se distingue par la même couleur que celle utilisée dans la Figure 5.12. Par exemple, le rouge désigne le protocole MCL-BCRP.

Dès les premiers rounds de simulation, les énergies moyennes dissipées révèlent que le protocole MCL-BCRP est plus efficace que les protocoles PEGASIS, LEACH et HEED (voir les Figure 5.12 et 5.13). Cependant, le protocole TEEN est légèrement moins efficace que le protocole MCL-BCRP. En effet, lorsque 50% de l'énergie initiale est consommée avec HEED (au round 133), PEGASIS (au round 299) et LEACH (au round 304), le protocole MCL-BCRP ne dissipe que 12,6%, 28,5% et 28,9% de l'énergie initiale. De plus, lorsque toutes les batteries sont épuisées respectivement avec les protocoles HEED (au round 265), LEACH (au round 772) et PEGASIS (au round 1014), le protocole MCL-BCRP est toujours fonctionnel avec des consommations énergétiques respectives de 25,22%, 71,14% et 83,2%. Malgré les performances similaires lors des premiers rounds, le protocole MCL-BCRP prolonge la durée de vie du réseau de 1696 rounds de plus que le protocole TEEN. Enfin, nous constatons que la consommation d'énergie est progressive avec le protocole MCL-BCRP par rapport au reste des protocoles HEED, LEACH et PEGASIS.

Les différentes performances observées en termes de gestion énergé-

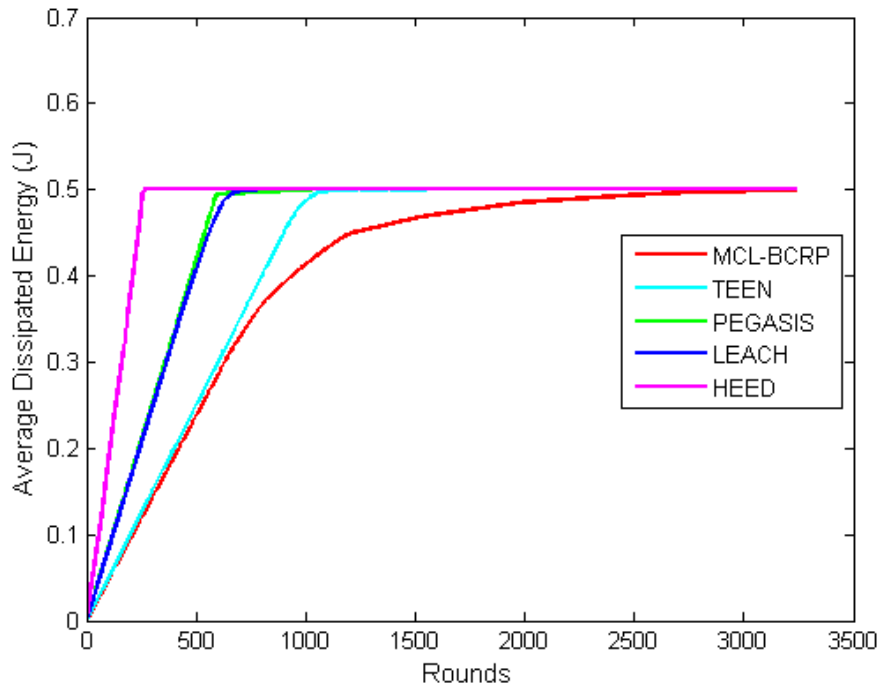


FIGURE 5.12 – Énergie moyenne dissipée par round avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED.

Round	MCL-BCRP (J)	TEEN (J)	PEGASIS (J)	LEACH (J)	HEED (J)
50	0.023866	0.025246	0.041770	0.040983	0.087756
100	0.047647	0.050519	0.083540	0.082045	0.184421
<b>133</b>	<b>0.063335</b>	<b>0.067080</b>	<b>0.111109</b>	<b>0.109052</b>	<b>0.249053</b>
150	0.071448	0.075674	0.125311	0.123122	0.280181
200	0.095274	0.100996	0.167081	0.164225	0.377182
250	0.119048	0.126124	0.208851	0.205416	0.478014
<b>265</b>	<b>0.126179</b>	<b>0.133730</b>	<b>0.221382</b>	<b>0.217798</b>	<b>0.500000</b>
<b>299</b>	<b>0.142380</b>	<b>0.150893</b>	<b>0.249786</b>	<b>0.245728</b>	-
<b>304</b>	<b>0.144767</b>	<b>0.153427</b>	<b>0.253963</b>	<b>0.249903</b>	-
<b>499</b>	<b>0.237562</b>	<b>0.249738</b>	<b>0.416867</b>	<b>0.407537</b>	-
<b>525</b>	<b>0.249890</b>	<b>0.262961</b>	<b>0.438587</b>	<b>0.427052</b>	-
650	0.308588	0.325207	0.495504	0.492692	-
<b>772</b>	<b>0.355743</b>	<b>0.386620</b>	<b>0.497016</b>	<b>0.500000</b>	-
<b>1014</b>	<b>0.416277</b>	<b>0.490103</b>	<b>0.500000</b>	-	-
<b>1542</b>	<b>0.469136</b>	<b>0.500000</b>	-	-	-
2000	0.485300	-	-	-	-
2500	0.493700	-	-	-	-
3000	0.498400	-	-	-	-
<b>3238</b>	<b>0.500000</b>	-	-	-	-

FIGURE 5.13 – Tableau comparatif montrant la dissipation moyenne de 50% et 100% de l'énergie initiale avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED.

tique entre les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED peuvent être justifiées par les points suivants :

- Le protocole HEED procède à une formation des clusters très consommatrice en énergie à chaque round avec un grand échange d'informations entre les différents capteurs du RCSF.
- Le protocole LEACH déclenche le processus de formation des clusters à chaque round avec des coûts (overheads) supplémentaires.
- Le protocole PEGASIS forme une seule chaîne et sélectionne un seul chain-leader à chaque round, ce qui épuise rapidement les batteries des chain-leaders sélectionnés.
- Malgré l'utilisation des communications multi-sauts, le protocole TEEN consomme une énergie considérable pendant la formation des clusters multi-niveaux.

Le protocole MCL-BCRP réduit sa consommation énergétique grâce aux avantages suivants :

- Le processus de formation des clusters est déclenché et exécuté par la station de base après la mort de chaque attracteur. Cet avantage empêche les capteurs de dépenser de l'énergie pendant le processus de formation des clusters.
- La restriction sélective des capteurs autorisés à envoyer leurs données aux CHs réduit considérablement l'énergie dissipée à chaque round.
- La sélection des CHs n'est pas coûteuse en termes d'énergie. En effet, cette sélection nécessite uniquement l'envoi des énergies résiduelles en début de chaque round.
- La proximité des CHs sélectionnés avec la station de base induit une conservation de l'énergie des cluster-heads, tandis que leur proximité des centres de gravité des clusters favorise l'atténuation de la consommation d'énergie lors des transmissions intra-clusters.

## 5.7 DURÉE DE VIE DES RCSFs

Pour l'étude de la durée de vie des réseaux de capteurs, nous avons également choisi de colorer les lignes correspondantes dans le tableau de la Figure 5.15 à la première et dernière mort de chaque protocole avec la même couleur que celle utilisée dans la Figure 5.14.

Les Figures 5.14 et 5.15 montrent que la meilleure durée de vie du RCSF est atteinte avec le protocole MCL-BCRP comparée aux autres protocoles :

- Les premières morts (7% du réseau) sont observées avec le protocole HEED (au round 255) avec une accélération de la mort des capteurs jusqu'à la mort de la totalité du réseau réduisant ainsi sa durée de vie à 265 rounds seulement. Cette accélération est due à la consommation excessive de l'énergie avec le protocole HEED.
- Le protocole LEACH retarde la première mort (1% du réseau jusqu'au round 401) par rapport au protocole HEED avec un taux de mortalité des capteurs légèrement plus lent que HEED (à partir



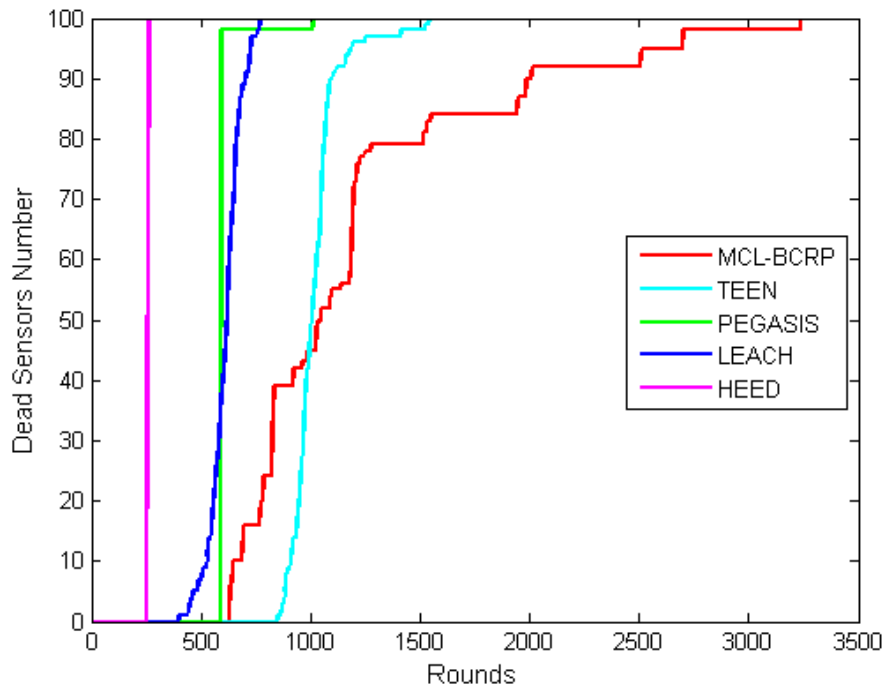


FIGURE 5.14 – Durée de vie des protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED.

Round	MCL-BCRP	TEEN	PEGASIS	LEACH	HEED
255	0	0	0	0	7
257	0	0	0	0	38
259	0	0	0	0	83
261	0	0	0	0	95
263	0	0	0	0	99
265	0	0	0	0	100
401	0	0	0	1	-
593	0	0	98	38	-
628	1	0	98	59	-
772	19	0	98	100	-
852	39	1	98	-	-
900	39	9	98	-	-
950	42	21	98	-	-
1000	45	49	98	-	-
1013	45	54	99	-	-
1014	45	54	100	-	-
1200	73	96	-	-	-
1300	79	97	-	-	-
1400	79	97	-	-	-
1500	79	98	-	-	-
1542	83	100	-	-	-
1800	84	-	-	-	-
2000	90	-	-	-	-
2500	92	-	-	-	-
3000	98	-	-	-	-
3238	100	-	-	-	-

FIGURE 5.15 – Nombre des capteurs morts par round avec les protocoles MCL-BCRP, TEEN, PEGASIS, LEACH et HEED.

du round 401 jusqu'au round 772). Ce résultat est plausible car la consommation d'énergie avec le protocole LEACH est plus atténuée que celle consommée avec le protocole HEED.

- Le protocole PEGASIS maintient les capteurs en vie plus longtemps que LEACH (jusqu'au round 593 de 98% du réseau) mais souffre de la mort collective de la majorité des capteurs du réseau. Le réseau ne contiendra que 2% de capteurs vivants jusqu'à sa mort (au round 1014), ce qui le rend non fonctionnel à partir du round 593 jusqu'au round 1014. Ce phénomène peut être justifié par la consommation uniforme d'énergie par tous les capteurs formant la chaîne PEGASIS.
- Le protocole TEEN semble être le meilleur protocole permettant de retarder la mort des capteurs. En effet, le protocole TEEN enregistre sa première mort durant le round 852. Cependant, le nombre de capteurs morts atteindra le nombre total du réseau pendant seulement 690 rounds réduisant ainsi la durée de vie du réseau.
- Le protocole MCL-BCRP retarde la première mort du réseau jusqu'au round 628 avec une augmentation progressive du nombre de capteurs morts par rapport à TEEN et le reste des protocoles. De plus, pendant des périodes significatives, le protocole MCL-BCRP réussit à maintenir un nombre stable de capteurs morts. Par exemple, le nombre de capteurs morts pendant la période allant du round 1300 au round 1500 est de 79 capteurs. De plus, le protocole MCL-BCRP prolonge la durée de vie du réseau jusqu'au round 3238 grâce à sa gestion efficace de l'énergie.

Pour conclure cette synthèse des performances, il est important de noter que lorsque le réseau meurt avec HEED, MCL-BCRP maintient 100% du réseau en vie. De plus, MCL-BCRP préserve respectivement 81% et 55% des capteurs vivants, lorsque le réseau meurt respectivement avec LEACH et PEGASIS. Enfin, MCL-BCRP réussit également à maintenir en vie 17% des capteurs après la mort du réseau avec le protocole TEEN. Par conséquent, le protocole MCL-BCRP présente un intérêt pratique élevé car il prolonge la durée de vie du réseau jusqu'à deux fois la durée de vie avec TEEN, trois fois la durée de vie avec PEGASIS, quatre fois la durée de vie avec LEACH et douze fois la durée de vie avec HEED.

## 5.8 CONCLUSION

Les résultats de simulation obtenus montrent que les performances du protocole proposé surmontent celles des protocoles LEACH, PEGASIS, HEED et TEEN.

En effet, ces résultats prouvent que le protocole proposé réduit, de manière significative, le taux de consommation d'énergie sur l'ensemble du réseau comparé aux protocoles LEACH, PEGASIS, HEED et TEEN. Cette efficacité dans la gestion énergétique est principalement due à la combinaison des caractéristiques du protocole MCL-BCRP suivantes :

- formation des clusters exécutée par la station de base,

- formation des clusters déclenchée uniquement suite à la mort de l'un des attracteurs,
- sélection des CHs peu coûteuse en énergie et en messages de contrôle,
- sélection restrictive des capteurs membres autorisés à envoyer les données vers les cluster-heads,
- proximité des CHs de la station de base et des centres de gravité des clusters.

De plus, les simulations montrent que le protocole MCL-BCRP garantit une meilleure couverture du réseau par l'ensemble des cluster-heads comparée au protocole LEACH. Cette couverture du réseau est induite par la répartition uniforme des cluster-heads sur la zone de captage grâce à la clustérisation uniforme du réseau avec le processus MCL.

# MES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

- TAIEB BRAHIM, M. , ABBAD, H., & BOUKLI-HACENE, S. (2021).  
A Low Energy MCL-Based Clustering Routing Protocol for Wire-  
less Sensor Networks. *International Journal of Wireless Networks  
and Broadband Technologies (IJWNBT)*, 10(1), 70-95.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

LE routage est l'une des fonctions les plus fondamentales dans un réseau de manière générale et dans les réseaux de capteurs sans fil en particulier. Le routage permet aux différents noeuds du RCSF d'assurer l'acheminement des données capturées entre des sources et des destinations. La propagation des données d'une source vers une destination se fait à travers plusieurs noeuds intermédiaires. Durant une telle transmission de données, un noeud consomme de l'énergie soit pour transmettre ses propres données, soit pour acheminer des données à d'autres noeuds.

L'énergie représente une ressource critique et constitue un obstacle majeur à l'exploitation des réseaux de capteurs. En effet, les ressources énergétiques des RCSFs sont principalement consommées lors des transmissions de données. Par conséquent, l'objectif principal dans la conception des protocoles de routage est d'utiliser efficacement l'énergie du réseau pour prolonger sa durée de vie.

Plusieurs travaux de recherche ont été proposés dans le but de prolonger la durée de vie des RCSFs en développant des protocoles de routage efficaces. Les protocoles de routage doivent faire face aux défis de conception en raison des capacités de calcul réduites, de stockage et surtout des sources d'énergie limitées des RCSFs pour atteindre les meilleures performances et répondre aux exigences des applications. Jusqu'à ce jour, il n'existe pas de protocoles de routage permettant d'atteindre l'efficacité énergétique optimale et de prolonger la durée de vie des RCSFs sans coûts supplémentaires et surcharge des réseaux.

Au cours de cette thèse, nous avons proposé un nouveau protocole de routage hiérarchique à base de l'algorithme de clustering MCL. Nous avons baptisé le protocole proposé MCL-BCRP "MCL Based Clustering Routing Protocol". Le protocole MCL-BCRP combine l'algorithme MCL pour la formation des clusters et une nouvelle stratégie de sélection des CHs basée sur la localisation et l'énergie résiduelle des capteurs. Les performances du protocole MCL-BCRP ont été comparées à celles des protocoles HEED, LEACH, PEGASIS et TEEN qui sont considérés comme les protocoles de routage hiérarchique les plus populaires.

Sur la base des résultats des simulations, nous pouvons conclure que le protocole MCL-BCRP réduit, de manière significative, la consommation d'énergie, prolonge la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles cités ci-dessus et garantit une meilleure couverture du réseau par l'ensemble des CHs comparé au protocole LEACH.

## PERSPECTIVES

Dans la continuité des travaux de recherche entrepris durant cette thèse, nous pouvons envisager les perspectives suivantes :

- Poursuivre l'étude de la couverture des RCSFs au sens large et l'approfondir pour le protocole MCL-BCRP dans le but de la comparer à celle des protocoles LEACH, PEGASIS, HEED et TEEN,
- Proposer des améliorations au protocole MCL-BCRP en termes de longévité, d'évolutivité et de sécurité,
- Adapter le principe du protocole MCL-BCRP pour résoudre des problématiques connues dans le cadre de l'Internet des objets (IoT) ainsi que les réseaux ad hoc véhiculaires,
- Évaluer les performances du protocole MCL-BCRP dans des environnements extrêmes et réalistes, tels que les réseaux avec une haute densité en présence d'obstacles.

# LISTE DES ACRONYMES

MCL	Markov CLuster algorithm
MCL-BCRP	MCL Based Clustering Routing Protocol
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
MANET	Mobile Ad-hoc NETworks
BS	Base Station ou station de base
CH	Cluster-Head
QoS	Quality of Service
GPS	Global Positioning System
TOA	Time Of Arrival
TDOA	Time Difference of Arrival
AOA	Angle of Arrival
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
DD	Directed Diffusion
RR	Rumor Routing
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
TEEN	Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network
APTEEN	Adaptive Threshold-sensitive Energy-Efficient sensor Network
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
SAR	Sequential Assignment Routing
HEED	Hybrid Energy Efficient Distributed
LEACH-C	LEACH-Centralized
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
PAH	Processus d'Analyse Hiérarchique
CLF	contrôleur en Logique Flou

# BIBLIOGRAPHIE

- Ababsa, R.  
2018. Etude comparative entre les protocoles hiérarchique et le protocole multi-chaine pegasis. Mémoire de Master. Université Larbi Ben M'ehdi.
- Abbasi, A. and M. Younis  
2007. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30(14) :2826–2841.
- Adlakha, S. and M. Srivastava  
2003. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking, WCNC*, volume 3, P. 1615–1620.
- Afsar, M. and M.-H. Tayarani-N  
2014. Clustering in sensor networks : A literature survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 46 :198–226.
- Ahmed, G., N. Khan, Z. Khalid, and R. Ramer  
2008. Cluster head selection using decision trees for wireless sensor networks. In *International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, P. 173–178.
- Akkaya, K. and M. Younis  
2005. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3 :325–349.
- Akyildiz, I. and M. Vuran  
2010. *Wireless Sensor Networks*. Wiley-Blackwell.
- Al-Karaki, J. and A. Kamal  
2004. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6) :6–28.
- Anno, J., L. Barolli, F. Xhafa, and A. Durresi  
2007. A cluster head selection method for wireless sensor networks based on fuzzy logic. In *IEEE Region 10 Conference, TENCON 2007*, P. 1–4.
- Azad, A., G. Pavlopoulos, C. Ouzounis, N. Kyripides, and A. Buluç  
2018. Hipmcl : A high-performance parallel implementation of the markov clustering algorithm for large-scale networks. *Nucleic Acids Research*, 46(6) :33– 33.
- Benabbassi, Y.  
2014. Application de la redondance pour la surveillance par réseau de capteurs sans fil : Cas du réseau de capteurs image sans fil. Thèse de Doctorat, Université d'Oran.



- Benazzouz, M.  
2013. Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil. Magistère IRM, ESI.
- Bian, X., X. Liu, and H. Cho  
2008. Study on a cluster-chain routing protocol in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Communications and Networking (ChinaCom)*, P. 964–968.
- Boushaba, M.  
2007. *Localisation des nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil*. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal.
- Boyinbode, O., H. Le, A. Mbogho, M. Takizawa, and R. Poliah  
2010. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. In *13th International Conference on Network-Based Information Systems*, P. 358–364.
- Braginsky, D. and D. Estrin  
2002. Rumor routing algorithm for sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications - WSNA*, volume 02, P. 22.
- Cetinkaya, O. and O. Akan  
2016. Use of wireless sensor networks in smart homes. In *Emerging Communication Technologies Based on Wireless Sensor Networks : Current Research and Future Applications*, P. 233–257.
- Challal, Y.  
2008. *Réseaux de Capteurs Sans Fil, Systèmes Intelligents pour le Transport*. Cours, Université de Technologie de Compiègne.
- Chang, R.-S. and C.-J. Kuo  
2006. An energy efficient routing mechanism for wireless sensor networks. *20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA'06*, 1 :5–5.
- Dishongh, T. and M. McGrath  
2009. *Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications*, 1 edition. Artech House.
- Doray, L. and L. Huard  
2001. On some new goodness-of-fit tests for the poisson distribution. In *New Trends in Statistical Modelling, Proceedings of the 16th International Workshop on Statistical Modelling*, B. Klein and L. Korsholm, eds., P. 429–435, Odense, Denmark.
- Enright, A., S. Van Dongen, and C. Ouzounis  
2002. An efficient algorithm for large-scale detection of protein families. *Nucleic Acids Research*, 30(7) :1575–1584.
- Fahmy, H.  
2016. *Wireless Sensor Networks : Concepts, Applications, Experimentation and Analysis*. Springer Singapore.

- Fan, Y. and J. Yu  
2007. The communication protocol for wireless sensor network about leach. In *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops (CISW)*, P. 550–553.
- Fan, Z. and H. Zhou  
2006. A distributed weight-based clustering algorithm for wsns. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, P. 1–5.
- Fisher, R., H. Thornton, and W. Mackenzie  
1922. The accuracy of the plating method of estimating the density of bacterial populations. : with particular reference to the use of thornton’s agar medium with soil samples. *Annals of Applied Biology*, 9(3–4) :325–359.
- Forster, A.  
2016. *Introduction to Wireless Sensor Networks*, 1st edition. Wiley-IEEE Press.
- Gherbi, C., Z. Aliouat, and M. Benmohammed  
2017. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensor Review*, 37(1) :12–25.
- Gnanavel, R., P. Anjana, K. Nappinnai, and N. Sahari  
2016. Smart home system using a wireless sensor network for elderly care. In *Second International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM)*, P. 51–55.
- Gupta, I., D. Riordan, and S. Sampalli  
2005. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks. In *3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference, CNSR’05*, P. 255–260.
- Gupta, S.  
2013. Clustering protocols in wireless sensor networks : A survey. *International Journal of Applied Information Systems*, 5 :10–10.
- Handy, M., M. Haase, and D. Timmermann  
2002. In low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, P. 368–372.
- Hasbullah, H. and B. Nazir  
2010. Region-based energy-aware cluster (rec) for efficient packet forwarding in wsn. *International Symposium on Information Technology*, 3 :1–6.
- He, T., J. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher  
2003. Speed : A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In *Proceedings of 23rd International Conference on Distributed Computing Systems*, P. 46–55.

- Heinzelman, W., A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan  
2000. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, P. 2–10.
- Heinzelman, W., A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan  
2002. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4) :660–670.
- Hoblos, G., M. Staroswiecki, and A. Aitouche  
2000. Optimal design of fault tolerant sensor networks. In *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications. Conference Proceedings. No.00CH37162*.
- Ilakkiyadeepaa, B., R. Selvarasu, and S. vidhni  
2015. Wireless Sensor Networks Based Smart Home Control System. 6.
- Intanagonwiwat, C., R. Govindan, and D. Estrin  
2000. Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th Annual Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, P. 56–67.
- Intanagonwiwat, C., R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva  
2003. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(1) :2–16.
- Jang, K., K. Kim, and H. Youn  
2007. An energy efficient routing scheme for wireless sensor networks. In *International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA)*, P. 399–404.
- Jing, C. and S. Hong  
2008. More energy-efficient leach for large-scale wsns. In *WIRELESS COMMUNICATIONS. Proceedings of the 4th International Conference on Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, P. 1–4.
- Julien-Vergonjanne, A., S. Sahuguède, and L. Chevalier  
2016. Optical wireless body area networks for healthcare applications. In *Optical Wireless Communications : An Emerging Technology*, M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, and E. Udvary, eds., P. 569–587. Springer International Publishing.
- Kar, K. and S. Banerjee  
2003. Node placement for connected coverage in sensor networks.
- Karl, H., A. Willig, and D. Wolisz  
2004. A short survey of wireless sensor networks. Technical Report.
- Karp, B. and H. Kung  
2000. Gpsr : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, volume *MobiCom '00*, P. 243–254.

- Kim, N., J. Heo, H. Kim, and W. Kwon  
2008. Reconfiguration of clusterheads for load balancing in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 31(1) :153–159.
- Kulik, J., H. Balakrishnan, and W. Heinzelman  
1999. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings on the 5th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, P. 174–185.
- Kulik, J., W. Heinzelman, and H. Balakrishnan  
2002. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 8(2) :169–185.
- Langendoen, K. and N. Reijers  
2003. Distributed localization in wireless sensor networks : A quantitative comparison. *Computer Networks*, 43(4) :499–518.
- Levis, P., N. Lee, M. Welsh, and D. Culler  
2003. Tossim : Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, P. 126–137.
- Li, X., N. Li, L. Chen, Y. Shen, Z. Wang, and Z. Zhu  
2010. An improved leach for clustering protocols in wireless sensor networks. In *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, volume 1, P. 496–499.
- Lindsey, S. and C. Raghavendra  
2002. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, 3 :3–3.
- Lindsey, S., C. Raghavendra, and K. Sivalingam  
2001. Data gathering in sensor networks using the energy\*delay metric. In *Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS 2001*.
- Liu, X.  
2012. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensors*, 12(8) :11113–11153.
- Macropol, K.  
2009. Clustering on graphs : The markov cluster algorithm (mcl). Technical Report. University of Utrecht.
- Makhoul, A.  
2008. Réseaux de capteurs : Localisation, couverture et fusion de données. Thèse de doctorat, Université Franche-comté, Besançon.
- Mamalis, B., D. Gavalas, C. Konstantopoulos, and G. Pantziou  
2009. Clustering in wireless sensor networks. In *RFID and Sensor Networks : Architectures, Protocols, Security and Integrations*, Y. Zhang, L. Yang, and J. Chen, eds., P. 324–353.

- Manjeshwar, A. and D. Agrawal  
2001. Teen : A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*.
- Manjeshwar, A. and D. Agrawal  
2002. Apteem : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless. In *Proceedings 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium*, volume 8.
- Matin, M. and M. Islam  
2012. Overview of wireless sensor network.
- Meguerdichian, S., F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. Srivastava  
2001. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society*, (3) :1380–1387.
- Meraihi, R.  
2005. Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc. Thèse de doctorat, ENST, Paris.
- Messai, S.  
2019. *Gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.
- Naeimi, S., H. Ghafghazi, C.-O. Chow, and H. Ishii  
2012. A survey on the taxonomy of cluster-based routing protocols for homogeneous wireless sensor networks. *12* :7350–7409.
- Ngom, D.  
2016. *Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau*. Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, Mulhouse.
- Ochieng, P., W. Kusuma, and T. Haryanto  
2016. Detection of protein complex from protein-protein interaction network using markov clustering. *Journal of Physics : Conference Series*, 835 :012001.
- Pen, R., J.-S. Qian, Y.-J. Sun, H.-F. Jiang, and Z.-L. Lu  
2010. Energy-balanced scheme based unequal density of backbone for wireless sensor networks under coal mine. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Technology and Computer Science (ITCS)*, P. 56–59, Kiev, Ukraine.
- Peng, D. and Q. Zhang  
2010. An energy efficient cluster-routing protocol for wireless sensor networks. In *International Conference On Computer Design and Applications*, volume 2, P. 2–530.
- Petriu, E., N. Georganas, D. Petriu, D. Makrakis, and V. Groza  
2001. Sensor-based information appliances. *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, 3 :31–35.

- Pottie, G. and W. Kaiser  
2000. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58.
- Priyantha, N.  
2005. The cricket indoor location system.
- Priyantha, N., A. Chakraborty, and H. Balakrishnan  
2000. The cricket location-support system. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, P. 32–43.
- Rostami, A., M. Badkoobe, F. Mohanna, H. Keshavarz, A. Hosseinabadi, and A. Sangaiah  
2018. Survey on clustering in heterogeneous and homogeneous wireless sensor networks. *The Journal of Supercomputing*, 74(1) :277–323.
- Saaty, T.  
2000. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. RWS publications. Vol. 6.
- Samara, G. and K. Blaou  
2017. Wireless sensor networks hierarchical protocols. In *8<sup>TH</sup> International Conference On Information Technology (ICIT)*.
- Savvides, A., C.-C. Han, and M. Strivastava  
2001. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, P. 166–179.
- Selmic, R., V. Phoha, and A. Serwadda  
2016. *Wireless Sensor Networks : Security, Coverage, and Localization*. Springer International Publishing.
- Shen, C.-C., C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo  
2001. Sensor information networking architecture and applications. *IEEE Personal Communications*, 8(4) :52–59.
- Shih, Y.-K. and S. Parthasarathy  
2012. Identifying functional modules in interaction networks through overlapping markov clustering. *Bioinformatics*, 28(18) :473– 479.
- Sirsikar, S. and K. Wankhede  
2015. Comparison of clustering algorithms to design new clustering approach. *Procedia Computer Science*, 49 :147–154.
- Sohrabi, K., J. Gao, V. Ailawadhi, and G. Pottie  
2000. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5).
- Stehlík, M.  
2011. *Comparison of Simulators for Wireless Sensor Networks*. Ph.D thesis, Masaryk University, Faculty of Informatics.

- Taieb Brahim, M., H. Abbad, and S. Boukli-Hacene  
2021. A low energy mcl-based clustering routing protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies*, 10(1) :70–95.
- Tanvir, S.  
2010. Localization in wireless sensor networks : Communication protocols and energy efficiency. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble.
- Tao, Y. and Y. Zheng  
2006. The combination of the optimal number of cluster-heads and energy adaptive cluster-head selection algorithm in wireless sensor networks. In *Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, P. 1–4.
- Tian, D. and N. Georganas  
2002. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, P. 32–41.
- Touati, Y., A. Ali-Chérif, and B. Daachi  
2017. *Gestion énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil*. ISTE Editions.
- Tsai, Y.-R.  
2007. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(4) :1240–1245.
- Turner, J., M. Ramli, L. Kamarudin, A. Zakaria, A. Shakaff, D. Ndzi, C. Nor, N. Hassan, and S. Mamduh  
2013. The study of human movement effect on signal strength for indoor wsn deployment. In *IEEE Conference on Wireless Sensor (ICWISE)*, P. 30–35.
- Van Dongen, S.  
1998. *A New Cluster Algorithm for Graphs*, CWI. Technical Report, Center for Mathematics and Computer Science. Amsterdam , Netherlands.
- Van Dongen, S.  
2000. Graph clustering by flow simulation. Ph.D Thesis, Universiteit Utrecht.
- Vijayalakshmi, S. and S. Muruganand  
2018. *Wireless Sensor Networks : An Introduction*. Mercury Learning Information.
- Wang, X., G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill  
2003. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, P. 28–39.
- Ward, A., A. Jones, and A. Hopper  
1997. A new location technique for the active office. *IEEE Personal Communications*, 4(5) :42–47.

- Wellenhoff, B., H. Lichtenegger, and J. Collins  
1997. *Global positions system : theory and practice*. Springer-Verlag.
- Xu, L., R. Collier, and G. O'Hare  
2017. A survey of clustering techniques in wsns and consideration of the challenges of applying such to 5g iot scenarios. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5) :1229–1249.
- Xu, Y., J. Heidemann, and D. Estrin  
2001. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '01*, P. 70–84.
- Yao, Y. and J. Gehrke  
2002. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM SIGMOD Record*, 31(3) :9–18.
- Yin, Y., J. Shi, Y. Li, and P. Zhang  
2006. Cluster head selection using analytical hierarchy process for wireless sensor networks. In *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, P. 1–5.
- Younes, Y.  
2012. Minimisation d'énergie dans un réseau de capteur. Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri.
- Younis, O. and S. Fahmy  
2004. Heed : A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(4) :366–379.
- Yu, Y., R. Govindan, and D. Estrin  
2001. Geographical and energy aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical report, 463. ucla computerscience department.
- Yu, Z., Y. Liu, and Y. Cai  
2008. Design of an energy-efficient distributed multi-level clustering algorithm for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, P. 1–4.
- Zhang, H., P. Chen, and S. Gong  
2010. Weighted spanning tree clustering routing algorithm based on leach. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC)*, P. 222–227.
- Zhang, H. and J. Hou  
2005. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. In *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*, J. Wu, ed. Auerbach Publications.



Zheng, J. and A. Jamalipour  
2009. *Wireless Sensor Network : A Networking Perspective*, volume 522.  
Wiley-IEEE Press.

# ملخص رسالة الدكتوراه

العنوان : مساهمة في الشبكات اللاسلكية : التوجيه القائم على خوارزمية ام سي  
أل لشبكات الاستشعار

## الملخص

جذبت شبكات الاستشعار اللاسلكية اهتمامًا متزايدًا خلال العقدين الماضيين. تستهدف تطبيقات هذه الشبكات مجموعة واسعة من المجالات مثل الرعاية الصحية، التحكم الصناعي، المراقبة البيئية وما إلى ذلك. التحدي الرئيسي لشبكات الاستشعار اللاسلكية هو الموارد المحدودة التي تتطلب إدارة فعالة لاستهلاك الطاقة. تعتبر التغطية أيضًا أحد المؤشرات الهامة لجودة الخدمة. و منه يجب التركيز في تصميم بروتوكولات التوجيه على الفعالية الطاقوية و تغطية الشبكة. في هذه الرسالة، نقترح بروتوكول توجيه هرمي جديد، اقتصادي للطاقة أكثر فعالية من بعض البروتوكولات البارزة ويوفر أحسن تغطية للشبكة من البروتوكول آ تسلسل الهرمي التجميعي التكيفي منخفض الطاقة. البروتوكول يجمع ما بين آخوارزمية ماركوف التجميعية لتكوين المجموعات وإستراتيجية جديدة لاختيار رأس المجموعة بناءً على الموقع والطاقة المتبقية لدى أجهزة الاستشعار. تظهر نتائج المحاكاة أن البروتوكول المقترح أفضل من البروتوكولات الأخرى من حيث إدارة الطاقة وإطالة عمر الشبكة، كما أنه يحقق تغطية جيدة أفضل من آ التسلسل الهرمي التجميعي منخفض الطاقة

**الكلمات الرئيسية :** المحطة الأساسية، رأس المجموعة، بروتوكولات التجميع، المجموعات، التغطية، خوارزمية ماركوف التجميعية، عمر الشبكة، المستشعرات، شبكات الاستشعار اللاسلكية

# RÉSUMÉ DE THÈSE

**Intitulé de Thèse : Contribution aux Réseaux Sans Fil : Routage à base de l'algorithme MCL pour les Réseaux de Capteurs**

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ont suscité une attention particulière au cours des deux dernières décennies. En effet, leurs applications visent un large éventail de domaines tels que la santé, le contrôle industriel, la surveillance de l'environnement, etc. Le principal défi des RCSFs est la limitation des ressources qui nécessite une gestion efficace de la consommation d'énergie. La couverture est également considérée comme l'un des indicateurs critiques de la qualité de service (QoS) des RCSFs. Par conséquent, la conception des protocoles de routage doit se concentrer sur l'efficacité énergétique et la couverture du réseau. Dans cette thèse, nous proposons un nouveau protocole hiérarchique à basse énergie, plus efficace que certains protocoles de routage connus en littérature et offrant une meilleure couverture du réseau que le protocole LEACH. Le protocole combine l'algorithme MCL pour la formation de clusters et une nouvelle stratégie de sélection des CHs basée sur l'emplacement et l'énergie résiduelle des capteurs. Les résultats de simulation montrent que le protocole proposé est meilleur que certains protocoles existants en termes de gestion de l'énergie et de prolongation de la durée de vie des réseaux, tandis qu'il assure une meilleure couverture que le protocole LEACH.

**Mots-Clés :** MCL (Markov Clustering Algorithm), RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil), Nœuds capteur (capteurs), Clusters, Chef de cluster (Cluster-Head : CH), Station de Base (BS), Protocoles Hiérarchiques, Durée de vie, Couverture.

# ABSTRACT

**Title : Contribution to Wireless Networks: MCL based Routing for Wireless Sensor Networks**

## **Abstract**

Wireless sensor networks (WSNs) have attracted increasing attention during the two last decades. Indeed, their applications target a wide range of fields such as healthcare, industrial control, environmental monitoring, etc. The main challenge of WSNs is the limitation of resources requiring efficient management of energy consumption. Coverage is also considered as one of the critical indicators of the quality of service (QoS) of WSNs. Therefore, the design of routing protocols should focus on energy efficiency and network coverage. In this thesis, we propose a novel energy-efficient clustering protocol that is more efficient than some prominent routing protocols and offers better coverage of the network than LEACH. The protocol combines the MCL algorithm for cluster formation and a new cluster head selection strategy based on location and residual energy of sensors. Simulation results demonstrate that the proposed protocol is better than other protocols in terms of energy management and extending the lifetime of the network, whereas, it achieves good coverage than LEACH.

**Keywords :** MCL (Markov Clustering Algorithm), WSNs (Wireless Sensor Networks), Sensor nodes (sensors), Clusters, Cluster head (CH), Base station (BS), Clustering protocols, Network lifetime, Coverage.