



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

Université Abderahmane Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique

ÉCOLE DOCTORALE RÉSEAUX ET SYSTÈMES DISTRIBUÉS

Mémoire de Magistère

En Informatique

Option : Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

Regroupement avec équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil

Présenté par

Nadjat KHOULALENE

Devant le jury composé de :

Président	RADJEF Mohand Said	Professeur	Université de Béjaïa	Algérie
Rapporteur	AÏSSANI Djamil	Professeur	Université de Béjaïa	Algérie
Examinatrice	LLADÓ Catalina	M.C	Université des îles Baléares	Espagne
Examineur	BOUKERAM Abdellah	M.C	Université de Sétif	Algérie
Invitée	BOUALLOUCHE Louiza	M.C	Université de Béjaïa	Algérie

Promotion 2006 – 2007

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu le P^r Djamil AÏSSANI, c'est un très grand honneur qu'il me fait en acceptant de m'encadrer.

Un grand merci au D^r Louiza BOUALLOUCHE pour avoir accepté de me prendre sous son aile pendant plusieurs années. Je tiens tout particulièrement à la remercier pour m'avoir toujours entraîné dans la bonne direction, de m'avoir fait confiance et surtout d'avoir eu du temps pour moi lorsque j'en avais énormément besoin.

Je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail. Le P^r Djamil AÏSSANI en tant que rapporteur, D^r Catalina LLADÓ et D^r Abdellah BOUKERAM en tant qu'examinateurs et le P^r Mohand Said RADJEF en tant que président.

Je voudrais remercier ma famille pour leur support tout au long de mes études : À mes parents pour m'avoir donné goût aux études et m'avoir apporté un grand support moral lors de la rédaction de ce mémoire et tout au long de mes études. À ma sœur Sonia et mes deux frères Nadjim et Sofiane qui m'ont aidé à supporter les moments de doutes, merci d'être à mes côtés, tout simplement. À tous mes oncles et tantes qui m'ont poussé à aller jusqu'au bout. À tous mes cousins et cousines pour leur soutien lorsque je sombrais dans un pessimisme effrayant.

Je ne peux oublier l'ensemble de mes amis qui m'ont apporté leur soutien, mes premières pensées se dirigent vers Assia MOUHOUS, Samira KHERFELLAH, Sonia KACI, Mouna HADJRES et Assia ARAB pour leur support, leurs aides multiples ou tout simplement pour leur amitié. Merci d'avoir été toujours là pour moi.

Je remercie ardemment M^{elle} BOULFEKHAR pour son oreille attentive et ses remarques pertinentes.

Je souhaite à tous mes collègues de l'école doctorale une bonne continuation et tous mes vœux de réussite. Je pense particulièrement à Mouna, Hassane, Meriem et Noura. Pour d'autres, l'étape de la soutenance est déjà un souvenir, je leur souhaite bonne chance pour leur future carrière.

Ma reconnaissance va particulièrement à tous mes enseignants de l'école doctorale d'Informatique et du département d'Informatique de l'université A/Mira de Béjaia.

Et un merci tout particulier à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à la
mémoire de mon
oncle Karim.*

Résumé

Les avancées technologiques récentes et la quête perpétuelle de nouveaux services et applications ont fait apparaître une nouvelle forme de réseau sans fil : les réseaux de capteurs. Le développement des protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs a attiré une grande part d'intention parmi les chercheurs dans le domaine.

Partant du constat que les concepteurs, au moment du développement des protocoles de routage, en particulier les protocoles hiérarchiques, négligent les autres métriques de performance au détriment du facteur de consommation d'énergie, nous insisterons sur les aspects d'optimisation de l'utilisation des mémoires et des processeurs pour conserver aussi longtemps que possible les informations acquises jusqu'à atteindre une situation optimale de transmission.

C'est pour cela que dans ce travail, nous proposons un algorithme de regroupement avec équilibrage de charge nommé CLB (A Clustering based Load Balancing Algorithm for Sensor Networks). Son principe consiste à sélectionner un cluster-head en fonction d'un vote induisant une dépendance des poids des capteurs au voisinage au degré 2. Une fois les cluster-heads désignés, les capteurs non élus se rattachent aux cluster-heads disposant de plus grandes ressources (énergétiques, mémorielles et calculatoires) et ayant un minimum de charge (le nombre de capteurs à gérer).

L'évaluation de performances de l'algorithme proposé montre qu'il assure une réduction considérable du nombre de clusters solitaires et une meilleure distribution des ressources des cluster-heads par rapport au protocole VCA et ce grâce à une meilleure sélection des cluster-heads et grâce à la procédure de regroupement avec équilibrage de charge adoptée visant à équilibrer le nombre de capteurs par cluster en fonction de la charge des cluster-heads.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Equilibrage de charge, clusterisation, Optimisation des ressources.

Abstract

The recent technological headways and the perpetual quest of new services and applications created a new shape of wireless networks : wireless sensor networks. The development of the specific routing protocols to wireless sensor networks attracted a big part of intention among the researchers in the domain.

Leaving the report that the designers, at the time of develop routing protocols, neglect the other performances metrics to the detriment of energy consumption factor ; we insist on the aspect of optimization memories and processors use to preserve as long as possible the information acquired until reach an optimal situation of transmission. For this, in this work, we propose a Clustering based Load Balancing Algorithm for Sensor Networks : CLB. Its principle consists in selecting a cluster-head according to a vote inferring a dependence of the weights of the sensors in the neighborhood in the degree 2. Once cluster-heads were appointed, every non elected sensor is connected to cluster-head having bigger resources (energy, memory and processor) and having a minimum of load (the number of sensors to manage).

The performances evaluation of the proposed algorithm shows that it insures a considerable reduction of the number of solitary clusters and a better distribution of the cluster-heads resources with regard to the VCA protocol thanks to a better selection of cluster-heads and thanks to adopted clustering procedure with balancing of the number of sensors by cluster according to the load of cluster-heads.

keywords : Wireless sensor networks, Load balancing, clustering, Resources optimization.

Liste des Acronymes

AODV	Ad hoc O n-demand D istance V ector
CBRP	Cluster B ased R outing P rotocol
CLB	Clustering based L oad B alancing Algorithm for Sensor Networks
DD	Directed D iffusion
DSDV	Dynamic destination S equenced D istance V ector
DSR	Dynamic S ource R outing
DVS	Dynamic V oltage S caling
GAF	Geographic A daptative F idelity
GBR	Gradient- B ased R outing
GEAR	Geographic and E nergy A ware R outing
GPS	Global P ositioning S ystem
GPSR	Greedy P erimeter S tateless R outing
GSR	Global S tate R outing
HEED	A H ybrid E nergy- E fficient D istributed clustering approach for ad-hoc sensor networks

IEEE	Institute of E lectrical and E lectronics E ngineers
ISM	Industrial S cientific M edical bands
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy
MAC	M edia A ccess C ontrol
MANET	M obile A d hoc N ETwork
MEMS	M icro- E lectro- M echanical S ystems
NS-2	N etwork S imulator 2
PDA	P ersonal D igital A ssistant
PEGASIS	P ower- E fficient G Athering in S ensor I nformation S ystem
QdS	Q ualité d e S ervice
QoS	Q uality o f S ervice
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il
SAR	S equential A ssignement R outing
SB	S tation de B ase
SPIN	S ensor P rotocols for I nformation via N egotiation
TDMA	T ime D evision M ultiple A ccess
VCA	An E nergy- E fficient V oting C lustering A lgorithm
WCA	W eighted C lustering A lgorithm
WSN	W ireless S ensor N etwork
ZRP	Z one R outing P rotocol

Table des matières

Table des Matières	vi
Table des Figures	ix
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1
1 Présentation des réseaux Ad hoc et des RCSFs	4
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation des environnements mobiles	5
1.3 Les réseaux Ad hoc	6
1.3.1 Définition d'un réseau Ad hoc	6
1.3.2 Caractéristiques des réseaux ad hoc	7
1.3.3 Les applications des réseaux Ad hoc	7
1.3.4 Routage dans les réseaux Ad hoc	9
1.4 Les réseaux de capteurs sans fil	11
1.4.1 Définition des réseaux de capteurs sans fil	12
1.4.2 Architecture	12
1.4.3 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil	15
1.4.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil	18
1.4.5 Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil	19
1.4.6 Domaines d'application	25
1.4.7 Scénarios typiques	26
1.5 Comparaison entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs	30

1.6	Conclusion	31
2	Routage et économie d'énergie dans les RCSFs	32
2.1	Introduction	32
2.2	Les Défis du routage dans les réseaux de capteurs	33
2.2.1	Le déploiement des capteurs	33
2.2.2	Modèle de livraison de données	34
2.2.3	Hétérogénéité des nœuds/liens	34
2.2.4	Qualité de service	35
2.2.5	Agrégation/fusion de données	35
2.2.6	Dynamacité du réseau et mobilité	36
2.3	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs	37
2.3.1	Classification selon la structure du réseau	38
2.3.2	Classification selon les fonctions des protocoles	48
2.3.3	Classification selon l'établissement de la route	51
2.3.4	Classification selon l'initiateur de communication	52
2.4	Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	53
2.4.1	Energie de capture	53
2.4.2	Energie de traitement	54
2.4.3	Energie de communication	54
2.5	Conclusion	62
3	Equilibrage de charge dans les RCSFs	64
3.1	Introduction	64
3.2	Principe de l'équilibrage de charge	65
3.3	Application des techniques d'équilibrage de charge aux RCSFs	66
3.3.1	Protocole avec réception en $O(1)$	67
3.3.2	VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks)	68
3.3.3	Algorithme de clusterisation et d'équilibrage de charge dans les RCSFs avec cluster-heads mobiles	70

3.3.4	Algorithme d’optimisation de la durée de vie dans un réseau de capteurs	71
3.3.5	Algorithme d’équilibrage de charge à nœud central pour les RCSFs	71
3.4	Principe de l’algorithme d’équilibrage de charge proposé	72
3.5	Conclusion	74
4	Algorithme de regroupement avec équilibrage de charge pour les RCSFs (CLB)	75
4.1	Introduction	75
4.2	Motivations	77
4.3	Clusterisation par équilibrage de charge	77
4.3.1	Phase d’initialisation	78
4.3.2	Phase d’auto-désignation des cluster-heads	79
4.3.3	Phase de rattachement aux cluster-heads	80
4.3.4	Phase de mise à jour des poids d’éligibilité et des facteurs de charge	81
4.4	Simulation et analyse des performances	82
4.4.1	Métriques de performances	83
4.4.2	Modèle de simulation	84
4.4.3	Evaluation de performances	90
4.5	Conclusion	98
	Conclusion générale & Perspectives	99
	Bibliographie	101

Table des figures

1.1	Classification des protocoles de routage	10
1.2	Architecture d'un capteur sans fil	14
1.3	Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil.	15
1.4	La pile Protocolaire.	16
1.5	Types de communication dans un réseau de capteurs sans fil.	17
1.6	Echantillonnage périodique avec rapatriement automatique.	27
1.7	Surveillance périodique avec rapatriement en cas de réalisation d'une condition particulière.	28
1.8	Surveillance par interrogation ponctuelle initiée par la station de base.	29
2.1	Agrégation de données	36
2.2	Les approches de routage dans les réseaux de capteurs	37
2.3	Exemple d'un réseau avec des métriques d'énergie	61
4.1	Emission du vecteur (e,m,c) par chaque capteur à tous ses voisins	78
4.2	Envoi des notes déterminées	79
4.3	Constitution des vecteurs de poids d'éligibilité	80
4.4	Envoi des facteurs de charge par les cluster-heads à leurs voisins	81
4.5	Rattachement des capteurs aux cluster-heads	81
4.6	Modèle d'énergie	86
4.7	Etapas de réalisation du simulateur	89
4.8	Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée des capteurs	91

4.9	Variation du nombre de clusters solitaires en fonction de la portée des capteurs	92
4.10	Variation du nombre d'itérations en fonction de la portée des capteurs	93
4.11	Variation de la quantité d'énergie consommée en fonction de la portée des capteurs	94
4.12	Distribution de l'énergie résiduelle des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs	95
4.13	Distribution de la capacité mémorielle des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs	97
4.14	Distribution de la capacité calculatoire des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs	98

Liste des tableaux

1.1	Description des familles de protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc	11
4.1	Types de capteurs sans fil	85
4.2	Types de messages	85
4.3	Variables descriptives du système	87
4.4	Evènements discrets du système	88

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le développement technologique des réseaux à communications sans fil a connu un essor important grâce aux avancées technologiques dans divers domaines tels que la micro-électronique et la miniaturisation. C'est ainsi que de nouvelles voies d'investigation ont été ouvertes avec l'émergence des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Des réseaux à hôtes autonomes et à infrastructures non-prédéfinies, utilisés dans des domaines très variés, tels que la détection de flux de radiation, le suivi d'objets en déplacement, ou encore la prévention de catastrophes naturelles.

Le développement de réseaux de capteurs devient aujourd'hui accessible à moindres frais grâce à la disponibilité de composants de faible consommation mais excessivement puissants (microprocesseurs et mémoires) et de sources d'énergie de plus en plus performantes. Divers modes de communication entre capteurs émergent comme des standards potentiels, avec des compromis entre la portée, le débit et la consommation.

Les capteurs sont des interfaces entre l'environnement et les systèmes. Les besoins de mesurer de nombreux paramètres biophysiques et chimiques en font des éléments indispensables à la conception des systèmes qui contrôlent l'environnement et interagissent avec ce dernier. Cependant, le capteur n'est qu'une première étape dans un système intelligent. En effet, le système doit pouvoir répondre à certains critères afin d'apporter l'intelligence suffisante à notre environnement pour le maîtriser. Toutefois, cette intelligence de traitement reste locale. Bien souvent, la maîtrise d'un milieu passe par l'analyse complète d'informations issues d'un environnement multi-capteurs multi-domaines de mesure à positions variables.

Une problématique majeure dans les réseaux de capteurs est la maîtrise de l'éner-

gie consommée par chaque nœud capteur. En effet, chaque nœud est alimenté par une batterie dont la capacité est limitée et qui n'est pas rechargeable. Ainsi, pour qu'un réseau de capteurs ait une longévité maximale, il faut que la consommation d'énergie soit prise en compte à tous les niveaux de l'architecture réseau. Comme les protocoles mis en œuvre doivent en particulier intégrer cette contrainte, beaucoup de travaux dans le domaine des réseaux de capteurs ont proposé de nouveaux protocoles de communication (contrôle de l'accès au médium de communication, routage, etc).

Partant du constat que les concepteurs, au moment du développement des protocoles, négligent les autres métriques de performance au détriment du facteur de consommation d'énergie, nous insisterons sur les aspects d'optimisation de l'utilisation des mémoires et des processeurs pour conserver aussi longtemps que possible les informations acquises jusqu'à atteindre une situation optimale de transmission. Afin de proposer une approche permettant d'assurer la plus grande longévité possible, tout en optimisant d'autres ressources (mémoires et processeurs) dans un réseau de capteurs sans fil, notre intérêt s'est porté sur la combinaison d'un algorithme de clusterisation (regroupement) et d'une technique d'équilibrage de charge afin de pouvoir tirer profit des avantages des deux parties.

L'objectif du travail présenté est donc de proposer une approche permettant de trouver un compromis entre la consommation énergétique et l'optimisation de l'utilisation des mémoires et des processeurs entre capteurs voisins de façon distribuée.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des environnements mobiles puis à une synthèse sur les réseaux ad hoc, en décrivant leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les différentes classes de protocoles conçues pour ce type de réseaux. Nous consacrons par la suite le reste du chapitre à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Ainsi, un aperçu général sur les réseaux de capteurs, leurs types de communication, leurs facteurs de conception, leurs domaines d'application ainsi que les différentes classifications de ces réseaux seront présentés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre décrit les défis liés à la conception d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce même chapitre, les approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sont discutées et une classification des protocoles conçus pour ce type de réseaux est ainsi présentée. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de quelques mécanismes visant à minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le troisième chapitre, après la définition de la notion d'équilibrage de charge, nous passerons en revue quelques protocoles avec équilibrage de charge développés pour les réseaux de capteurs sans fil.

Le quatrième chapitre présente notre contribution dans la problématique d'optimisation de l'utilisation des ressources des capteurs (énergie, mémoire, processeur) dans les réseaux de capteurs sans fil, en décrivant les détails conceptuels de l'algorithme de regroupement proposé (CLB). Ce même chapitre présente les résultats de simulations réalisées, avec une comparaison des performances de CLB avec celles de VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks).

Enfin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi que des perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

1

Présentation des réseaux Ad hoc et des RCSFs

1.1 Introduction

L'essor des technologies sans fil, offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. L'évolution rapide de la technologie dans le domaine de communication sans fil, a permis à des usagers munis d'unités de calcul portables d'accéder à l'information indépendamment des facteurs : temps et lieu. Ces unités, qui communiquent à travers leurs interfaces sans fil, peuvent être de diverses configurations : avec ou sans disque, des capacités de sauvegarde et de traitement plus ou moins modestes, et alimentées par des sources d'énergie autonomes (batteries). L'environnement de calcul résultant est appelé environnement mobile (ou nomade). Cet environnement n'astreint plus l'utilisateur à une localisation fixe, mais lui permet une libre mobilité tout en assurant sa connexion au réseau [11]. Les environnements mobiles permettent une grande flexibilité d'emploi. En particulier, ils permettent la mise en réseau des sites dont le câblage serait trop onéreux à réaliser dans sa totalité, voire même impossible.

L'environnement mobile offre beaucoup d'avantages par rapport à l'environnement statique. Cependant de nouveaux problèmes peuvent apparaître (le problème de routage par exemple [26]), causés par les nouvelles caractéristiques du système. Les solutions conçues pour les systèmes distribués avec des sites statiques, ne peuvent donc pas être utilisées directement dans un environnement mobile. De nouvelles solutions doivent être trouvées pour s'adapter aux limitations qui existent, ainsi qu'aux facteurs qui rentrent en jeu lors de la conception.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les environnements mobiles puis une synthèse sur les réseaux ad hoc, en décrivant leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les différents protocoles conçus pour ce type de réseaux. Nous consacrons par la suite le reste du chapitre à l'étude des réseaux de capteurs sans fil.

1.2 Présentation des environnements mobiles

Un environnement mobile est un système composé de sites mobiles permettant à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil peuvent être classés en deux catégories, les réseaux cellulaires avec infrastructure (infrastructured nets), et les réseaux ad hoc sans infrastructure fixe (infrastructureless nets).

Le modèle de système intégrant des sites mobiles et qui a tendance à se généraliser, est composé de deux ensembles d'entités distinctes : les "sites fixes" d'un réseau de communication filaire classique, et les "sites mobiles". Certains sites fixes, appelés Mobile Support Station ou station de base (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites ou unités mobiles (UM), localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule. A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, généralement fiable et d'un débit élevé, les liaisons sans fil ont une bande passante limitée qui réduit considérablement le volume des informations échangées. Dans ce modèle, une unité mobile ne

peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée.

Le modèle de réseau sans infrastructure préexistante ne comporte pas l'entité "site fixe" : tous les sites du réseau sont mobiles et communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé de stations de base oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau [44].

1.3 Les réseaux Ad hoc

Il est possible d'envisager un réseau sans fil universel où chaque mobile participerait aux communications. Si la couverture du réseau est suffisante (c'est-à-dire qu'il existe assez de nœuds pour un espace donné), chaque nœud du réseau peut joindre un autre, soit s'il est à portée radio, soit en utilisant des nœuds situés entre eux deux pour relayer leurs messages. Ce contexte est connu sous le nom de réseaux ad hoc. Si l'idée générale d'un réseau ad hoc est triviale, il n'en est pas de même pour la réalisation et le déploiement d'un tel système. Il existe de très nombreux défis à résoudre : trouver le chemin entre deux nœuds ou assurer une bonne stabilité dans les communications entre deux nœuds par exemple [16].

1.3.1 Définition d'un réseau Ad hoc

Un réseau sans fil ad hoc (ou MANET, pour Mobile Ad hoc NETWORK) est formé par un ensemble d'hôtes qui s'organisent seuls et de manière totalement décentralisée, formant ainsi un réseau autonome et dynamique ne reposant sur aucune infrastructure filaire. Ces hôtes peuvent être fixes ou mobiles, mais l'on considère qu'ils sont mobiles dans la plupart des cas. Selon ces hypothèses, tout ensemble d'objets munis d'une interface de communication adéquate est susceptible de spontanément former un tel réseau. Aucune infrastructure n'étant disponible, ces objets ont donc à découvrir dynamiquement leur environnement.

Un réseau ad hoc étant avant tout un réseau sans fil, les objets communiquent entre

eux par le biais d'une interface radio. Ces communications sont donc soumises aux phénomènes physiques qui régissent les ondes radio, telle qu'une forte atténuation du signal avec la distance. Ainsi, seuls les hôtes suffisamment proches les uns des autres sont capables de communiquer directement ensemble, et les communications de longue distance doivent s'effectuer par le biais d'un mécanisme nommé multi-sauts : cela signifie simplement que certains objets doivent relayer les messages de proche en proche jusqu'à ce que leur acheminement soit effectué. L'utilisation d'une antenne radio omnidirectionnelle implique également qu'un message envoyé par un émetteur quelconque est reçu par tous les récepteurs suffisamment proches de lui [74].

1.3.2 Caractéristiques des réseaux ad hoc

Les réseaux mobiles Ad hoc sont caractérisés par une topologie dynamique (en perpétuel mouvement) due à la mobilité des nœuds, une bande passante limitée qui influe considérablement sur le volume des informations échangées, des liaisons à débits variables résultants des changements des liens, des contraintes d'énergies modestes, une sécurité physique limitée suite à la vulnérabilité du support de communication classique (attaques par écoute, par usurpation d'identité et par déni de service), l'absence d'infrastructure (les nœuds sont eux mêmes responsables de l'établissement et le maintien de la connectivité du réseau durant toute sa mise en place) et des connexions variables.

Bien que les réseaux Ad hoc offrent pas mal d'avantages comme le coût du matériel et le coût de mise en place ; cependant, ils souffrent de pas mal de lacunes comme les liaisons asymétriques (des communications à sens unique entre nœuds), le problème d'interférences qui engendre un taux d'erreurs de transmission et affaiblit plus les performances d'un lien radio et la mobilité des nœuds qui entraîne des ruptures fréquentes des routes ce qui provoque un taux d'erreurs assez conséquent [74].

1.3.3 Les applications des réseaux Ad hoc

Les recherches sur les réseaux Ad hoc ont été initiées par le DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) avec le développement de PRN (Packet Radio Networks) [9]. Ce protocole, conçu par l'armée américaine, permet de déployer une infrastructure de communication entre chaque bataillon, par l'intermédiaire de

plusieurs véhicules communiquant ensemble. Il possède de bonnes solutions, comme la prise en compte de la qualité des liens. Mais ce protocole possède de trop nombreux défauts. D'une part, il prend l'hypothèse que l'ensemble des entités se déplace lentement (avec peu de changements dans la topologie du réseau). D'autre part, la difficulté de concevoir (dans les années 70) des dispositifs électroniques suffisants pour mémoriser les paquets lors d'une réémission impliquait un matériel de taille assez importante et difficile à utiliser.

Le fait que ce soit les militaires qui aient commencé les premières expérimentations sur les réseaux Ad hoc n'est pas un hasard. En effet, cette infrastructure est très adaptée aux environnements hostiles, car leur déploiement est rapide et ils sont robustes dans le cas des pertes de liens. De plus, la possibilité de posséder plusieurs routes renforce la fiabilité de l'ensemble du réseau. Ils sont donc particulièrement intéressants pour un système de communication sur les champs de bataille mais aussi dans d'autres environnements. On peut évoquer les sinistres (tremblements de terre, inondations, etc.) où l'ensemble des infrastructures existantes a été détruit. Les unités de secours disposent alors d'un moyen de communication qui n'est pas influencé par les dégâts causés à l'environnement. Ou encore, les survivants qui peuvent établir un réseau pour aider à leur localisation.

Les réseaux Ad hoc peuvent aussi être utilisés pour relier plusieurs ordinateurs entre eux. Ils sont donc adaptés pour la tenue de réunions, où la nécessité d'une infrastructure pour les communications est soutenue par l'ensemble des participants. Il existe également des recherches proposant d'utiliser les réseaux Ad hoc dans les véhicules routiers. On peut entrevoir de nombreuses applications possibles pour un tel usage : distribution d'information au niveau local (risque d'accidents ou d'encombres), aide automatique à la conduite (feux d'avertissement), téléphonie entre véhicules, etc.

Avec l'émergence de l'informatique mobile et les possibilités offertes par l'informatique vestimentaire (Wearable computing) chaque usager se voit doté d'ordinateurs qu'il transporte avec lui. Ces appareils peuvent se mettre à communiquer entre eux ou avec l'environnement. Dans le premier cas, on parle de réseau personnel (PAN : Personal Area Network) et la solution Ad hoc permet la liaison entre chacun des éléments (avec l'utilisation du Bluetooth par exemple, adapté pour de petits objets et

de courtes distances). Dans le deuxième cas, les réseaux Ad hoc permettent à chacun de se connecter à l'environnement et d'y participer sans pré-requis particulier. On parle alors d'informatique omniprésente (Ubiquitous Computing) : chaque entité se configure en fonction des communications disponibles, de façon transparente pour l'utilisateur.

Un autre domaine très intéressant pour les réseaux Ad hoc concerne les capteurs. Ce sont des équipements possédant des capacités limitées (énergie, mémoire, processeur, bande passante) et de taille réduite. Ces équipements ont de nombreux domaines d'applications. Ils sont en général utilisés en grande quantité et les réseaux Ad hoc permettent alors la liaison entre tous ces équipements [16].

1.3.4 Routage dans les réseaux Ad hoc

Du fait que le rayon de propagation des transmissions des hôtes soit limité et afin que le réseau ad hoc reste connecté (toute unité mobile peut atteindre toute autre), il se peut qu'un hôte mobile se trouve dans l'obligation de demander de l'aide à un autre hôte pour pouvoir communiquer avec son correspondant. Il se peut donc que l'hôte destination soit hors de la portée de communication de l'hôte source, ce qui nécessite l'emploi d'un routage interne par des nœuds intermédiaires afin de faire acheminer les paquets de messages à la bonne destination.

La gestion de l'acheminement des données ou le routage, consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau [66].

1.3.4.1 Caractéristiques des algorithmes de routage

Un algorithme de routage doit être en mesure d'optimiser les ressources du réseau, éviter les boucles de routage, empêcher la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens, assurer un routage optimal tout en prenant en compte les différentes métriques de coûts, s'adapter aux changements de topologie rapidement en proposant de nouvelles routes acceptables, même en cas de forte mobilité des terminaux [22] [70] [21]. La méthode adoptée dans le routage, doit donc offrir le meilleur acheminement des données en respectant les différentes métriques de coûts utilisées.

1.3.4.2 Classification des protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc

Les protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc sont fondés sur les principes fondamentaux du routage, qui sont : l'inondation, le vecteur de distance, le routage à la source et l'état de lien. Deux grandes catégories de protocoles se sont formées à partir de la normalisation de MANET. Les protocoles de routage proactifs qui établissent les routes à l'avance et les protocoles de routage réactifs qui cherchent les routes à la demande. D'autres classes sont à citer, à savoir les protocoles de routage hybrides (mélange des protocoles proactifs et réactifs), géographiques, hiérarchiques, à qualité de service et multicast [74].

La figure ci-dessous présente une classification des protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc qui peuvent être classés en deux grandes classes suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données [21] [2] [55].

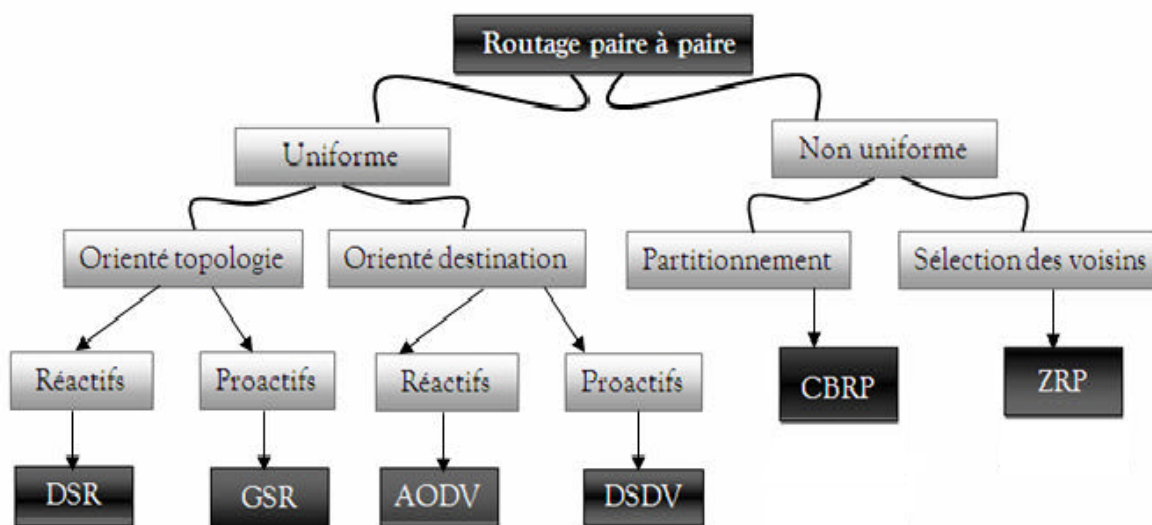


FIG. 1.1 – Classification des protocoles de routage

Dans le tableau suivant nous présentons une description des différentes familles de protocoles de routage conçus pour les réseaux Ad hoc. Ces protocoles se différencient par le niveau d'implication des nœuds dans le routage :

Type	Description
Uniformes	Tous les nœuds du réseau jouent le même rôle pour la fonction de routage.
Non uniformes	Une structure hiérarchique est donnée au réseau et que seuls certains nœuds assurent le routage.
Les protocoles orientés topologie	Chaque nœud utilise comme données l'état de ses connexions avec ses nœuds voisins ; cette information est ensuite transmise aux autres nœuds pour leur offrir une connaissance plus précise sur la topologie du réseau.
Les protocoles orientés destinations	Connus sous le nom de Distance Vector Protocols, ils maintiennent pour chaque nœud destination une information sur le nombre de nœuds qui les en séparent (la distance) et éventuellement sur la première direction à emprunter pour y arriver.
Les protocoles à partitionnement	Le réseau est découpé en zones dans lesquelles le routage est assuré par un unique nœud maître.
Les protocoles à sélection de voisins	Chaque nœud sous-traite la fonction de routage à un sous ensemble de ses voisins directs.

TAB. 1.1 – Description des familles de protocoles de routage dans les réseaux Ad hoc

1.4 Les réseaux de capteurs sans fil

Grâce aux avancées conjointes des systèmes microélectroniques et mécaniques (MEMS : Micro-Electro Mechanical Systems), des technologies sans fil, et de la microélectronique embarquée, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ont pu voir le jour [6].

1.4.1 Définition des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil (WSNs : Wireless Sensor Networks) sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc où l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs.

Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents "smart sensors", capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs, déployés pour une application, forme un réseau de capteurs. Le but de celui-ci est de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs-actionneurs). On peut citer comme exemples un réseau détecteur de feu de forêt, ou un réseau de surveillance de la solidité d'un pont après un tremblement de terre. Le réseau peut comporter un grand nombre de nœuds (des milliers).

Les capteurs sont placés de manière plus ou moins aléatoire (par exemple par largage depuis un hélicoptère) dans des environnements pouvant être dangereux. Toute intervention humaine, après le déploiement des nœuds capteurs, est la plupart du temps exclue ; le réseau doit donc s'autogérer.

Afin que les nœuds capteurs travaillent d'une façon coopérative, les informations recueillies sont partagées entre eux par voie hertzienne. Le choix du lien radio plutôt que le lien filaire permet un déploiement facile et rapide dans un environnement pouvant être inaccessible pour l'être humain [6] [24] [5].

1.4.2 Architecture

Un réseau de capteurs se compose d'une ou de plusieurs stations de base (nœuds puits ou sinks) et d'un certain nombre de nœuds capteurs. Chaque capteur est une unité avec la possibilité de rassembler et de traiter les données d'une manière indépendante. Les capteurs sont utilisés pour surveiller des activités dans un domaine spécifique et de transmettre les informations collectées à la station de base [42].

1.4.2.1 Architecture d'un capteur sans fil

Un nœud capteur contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie.

1) L'unité de captage : l'unité de captage est généralement composée de deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique. Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

2) L'unité de traitement : l'unité de traitement comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (TinyOS [36] par exemple). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communication qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits.

3) L'unité de transmission : cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Elle peut être de type optique, ou de type radio-fréquence. Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes. Par conséquent, elles ne peuvent pas établir de liaisons à travers des obstacles. Les unités de transmission de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ce qui implique une augmentation de la complexité et du coût de production du micro-capteur. Concevoir des unités de transmission de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un véritable défi. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Cependant, l'énergie consommée serait importante. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

4) **L'unité de contrôle d'énergie** : un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des micro-capteurs et du réseau en entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc l'un des systèmes les plus importants. Elle est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de recharge d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau de capteurs.

Le schéma ci-dessous fournit une vue globale d'une architecture typique d'un nœud capteur.

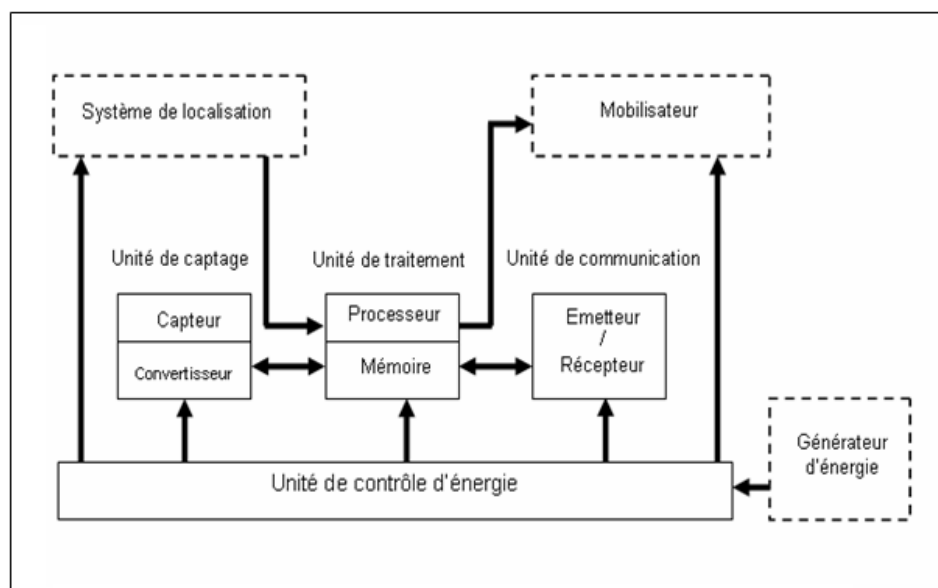


FIG. 1.2 – Architecture d'un capteur sans fil

En plus des quatre unités, citées ci-dessus, un nœud capteur peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité [85] [31].

1.4.2.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chaque nœud a la possibilité de collecter les données et de les router vers la station de base. Cette dernière, est un point de collecte de données capturées, qui communique les données à l'utilisateur via Internet ou par satellite ou un autre réseau de communication. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau de capteurs [5].

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil est illustrée dans la figure suivante :

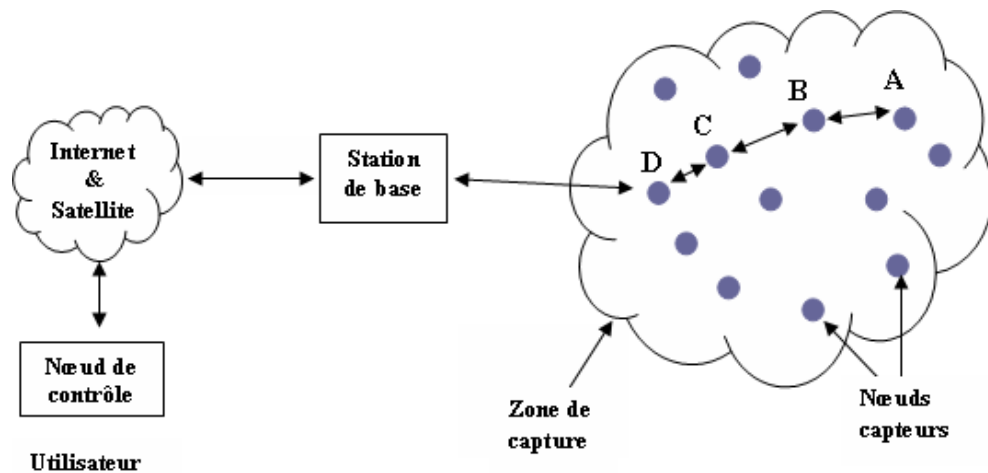


FIG. 1.3 – Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil.

1.4.3 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés dans un environnement sans infrastructure, en n'ayant aucune information sur la topologie globale même locale du réseau construit. Pour cela, les nœuds capteurs doivent graduellement établir l'infrastructure de communication durant une phase d'initialisation. Cette infrastructure doit leur permettre de répondre aux requêtes venant des sites distants, d'interagir avec l'environnement physique, réagir aux données captées et transmettre ces données via une communication multi-sauts.

1.4.3.1 La pile protocolaire

La pile protocolaire, utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs d'un réseau de capteurs (figure 1.4) comprend cinq couches :

- la couche application,
- la couche transport,
- la couche réseau,
- la couche liaison de données,
- la couche physique.

Et trois plans :

- le plan de gestion de l'énergie,
- le plan de gestion de la mobilité,
- le plan de gestion des tâches.

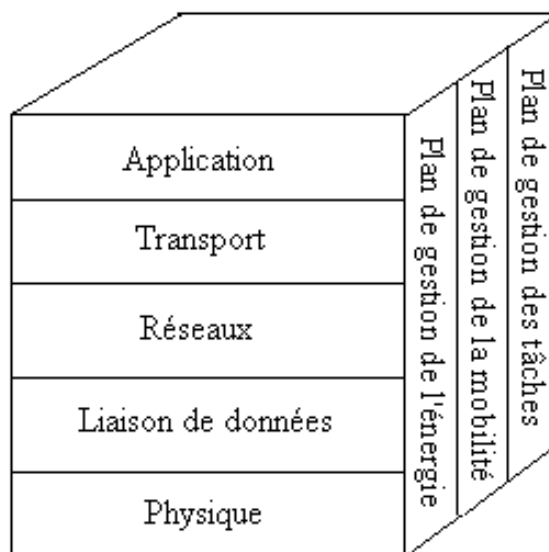


FIG. 1.4 – La pile Protocolaire.

Selon les tâches de capture, différents types de logiciels d'application peuvent être établis et employés dans la couche application. La couche transport aide à maintenir le flux de données si le réseau de capteurs l'exige. La couche réseau prend soin de router les données fournies par la couche transport. Puisque l'environnement est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, le protocole MAC (Media Access Control) de la couche liaison doit connaître l'état de l'énergie résiduelle (énergie restante) et doit aussi être capable de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins. La couche physique satisfait les besoins d'une modulation simple mais robuste ainsi

que les techniques de transmission et de réception.

En outre, les plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches surveillent respectivement la puissance, le mouvement et la distribution des tâches entre les nœuds capteurs. Ces plans de gestion sont nécessaires, de sorte que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données dans un réseau de capteurs mobile et partager les ressources entre les nœuds capteurs. Sans eux, chaque nœud capteur fonctionnera individuellement. Du point de vue global, il est plus efficace d'utiliser des nœuds capteurs pouvant collaborer entre eux. La durée de vie du réseau peut être ainsi prolongée [5].

1.4.3.2 Types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Le but d'un réseau de capteurs sans fil est la surveillance d'un environnement physique et la fourniture des informations capturées. Chaque nœud est équipé d'un ou plusieurs capteurs, par lesquels les données sont capturées et transportées à travers d'autres nœuds du réseau à la destination de données.

En général, deux types de nœuds sont identifiés logiquement : les nœuds qui principalement transmettent leurs propres données capturées (nœuds capteurs), et les nœuds qui transmettent les messages aux autres nœuds du réseau (nœuds de relais). Les données capturées sont acheminées depuis les nœuds sources jusqu'aux nœuds destinataires à travers les nœuds intermédiaires, créant ainsi une topologie multi-sauts. Comme illustré dans la figure 1.5, cette organisation logique implique quatre types de communications :

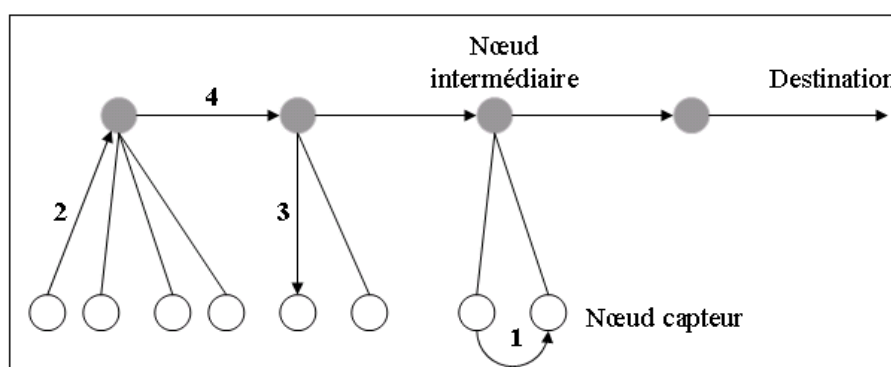


FIG. 1.5 – Types de communication dans un réseau de capteurs sans fil.

- *La communication d'un nœud capteur avec un autre nœud capteur* : ce type de communication directe est employé pour des opérations locales, par exemple pendant le processus de clusterisation (c'est l'organisation du réseau en structure cellulaire) [56].
- *La communication d'un nœud capteur avec un nœud intermédiaire* : les données capturées sont transmises d'un nœud capteur à un nœud intermédiaire. Ce type de communication est souvent unicast.
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud capteur* : les requêtes et la signalisation des messages sont souvent multicast. Elles sont diffusées par les nœuds intermédiaires pour atteindre un sous-ensemble des nœuds immédiatement (communication directe).
- *La communication d'un nœud intermédiaire avec un nœud intermédiaire* : la communication entre ces nœuds est la plupart du temps unicast [58].

Dans les quatre types de communication, l'énergie est une ressource critique qui fait de la consommation d'énergie une métrique primaire à considérer. De nombreuses techniques d'optimisation, parfois en opposition les unes aux autres, sont étudiées pour minimiser la dépense d'énergie et augmenter la durée de vie du réseau.

1.4.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Il existe deux grands types de réseaux de capteurs sans fil :

- 1) Réseau constitué d'un ensemble de capteurs mobiles évoluant dans un environnement statique. Le but d'un tel réseau, dans la plupart du temps, est l'exploitation de zones inaccessibles ou dangereuses [64]. Les travaux de recherche sont souvent orientés robotique, les nœuds jouent à la fois le rôle de capteurs et d'actionneur.
- 2) Réseau constitué de capteurs fixes servant à la surveillance d'occurrence d'évènements sur une zone géographique [87] [94]. Dans ce cas, le réseau n'effectue que

la surveillance, les données mesurées sont transmises en mode multi-sauts au nœud puits qui est chargé, après la réception, de mettre en œuvre les actions nécessaires. Ce puits peut être connecté, de manière filaire par exemple, à un autre réseau [64].

1.4.5 Facteurs de conception des réseaux de capteurs sans fil

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil est influencée par plusieurs paramètres, parmi lesquels nous citons la tolérance aux pannes, la scalabilité, le coût de production, l'environnement d'exploitation, la topologie du réseau, les contraintes matérielles, le support de transmission et la consommation d'énergie. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs. Ils sont également considérés comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine.

1.4.5.1 La tolérance aux pannes

La défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peuvent être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement.

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [6].

La tolérance aux pannes $R_k(t)$ est modélisée dans [37] en utilisant la distribution de Poisson afin de déterminer la probabilité qu'un nœud capteur k n'ait pas de panne durant l'intervalle de temps $[0,t]$:

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t)$$

Où λ_k est le taux de pannes du capteur k , et t est la période de temps.

Les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs doivent atteindre le niveau de tolérance aux pannes requis par le réseau, cela dépend essentiellement de l'environnement de déploiement du réseau, des caractéristiques des micro-capteurs, etc.

En effet, si le réseau de capteurs est destiné aux environnements avec un faible degré d'interférences, tels que ceux utilisés dans les bâtiments pour surveiller le taux d'humidité et le degré de température, les protocoles utilisés ne doivent pas cibler une

grande tolérance aux pannes, car dans ce type de réseau, il n'existe pas une grande interférence avec l'environnement, et ses nœuds ne sont pas exposés au risque d'endommagement.

Par contre, si le réseau est destiné aux applications militaires telle que la surveillance et le contrôle d'un champs de bataille, le niveau de tolérance aux pannes visé par les protocoles employés doit être très élevé, car les nœuds sont exposés à un grand risque d'endommagement par des actions hostiles et les informations captées sont très critiques.

Par conséquent, le niveau de tolérance aux pannes requis dépend de l'application du réseau de capteurs conçu et les schémas de conception doivent prendre en charge ce paramètre.

1.4.5.2 La scalabilité

La surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs, ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs. Cette densité peut varier entre quelques capteurs jusqu'à plusieurs centaines de capteurs dans une région de taille inférieure à 10 mètres de diamètre [6].

Suivant [14], la densité peut être calculée comme suit :

$$\mu(r) = (N\pi r^2)/A$$

Où N est le nombre de capteurs éparpillés dans une région A , et r la portée de transmission. $\mu(r)$ donne alors le nombre de nœuds se trouvant dans la portée de transmission r d'un nœud donné dans la région A .

La densité des nœuds dépend également de l'application pour laquelle le réseau de capteurs est employé. Une application de diagnostic de machines nécessite par exemple une densité proche de 300 nœuds par région de $25m^2$, tandis que la densité nécessaire pour le contrôle des véhicules ne peut pas dépasser 10 capteurs pour une région de même taille.

En général, la densité moyenne des nœuds dans un réseau de capteurs est estimée à 20 capteurs par m^3 [6].

1.4.5.3 Les coûts de production

Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau. Si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1\$ par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil.

La technologie bluetooth a pu offrir un système radio pour un coût de 10\$, ce qui est dix fois plus chère que le coût désiré pour un nœud capteur. Sachant qu'un nœud contient d'autres systèmes que celui de la transmission radio (les unités de captage et de traitement) et que le nœud peut être équipé d'éléments additionnels (GPS ou un système de rechargement d'énergie), le coût de production d'un capteur ne dépend pas uniquement du coût du système radio. Dès lors, la minimisation du coût de production du nœud capteur constitue un grand défi mené par les chercheurs, vu les fonctionnalités que doivent comporter ces nœuds et l'objectif désiré pour un coût inférieur à 1\$ [44].

1.4.5.4 Les contraintes matérielles

Comme nous l'avons invoqué précédemment, un nœud capteur peut contenir, en plus des quatre unités de base, d'autres unités dépendantes de l'application du réseau. En effet, la plupart des opérations de captage et des algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil requièrent la connaissance de la localisation des nœuds avec une grande précision, car ces nœuds sont déployés d'une manière aléatoire et fonctionnent d'une façon autonome. Ceci rend l'intégration d'une unité, consacrée au système de localisation, très commune dans un nœud capteur. D'où, il est souvent supposé que ces nœuds possèdent un système de localisation GPS avec une précision au moins égale à 5m [49]. Bien qu'il ait été montré que cette solution n'est pas viable pour les réseaux de capteur sans fil. Une autre approche proposée dans [72] consiste à doter un nombre limité de nœuds avec le système GPS, et aider les autres nœuds à trouver leurs positions d'une manière terrestre.

La conception des nœuds capteurs peut aller jusqu'à prévoir un système de mobilisation du capteur pour le déplacer en cas de nécessité. Toutes ces unités peuvent

exiger leur intégration dans un boîtier de taille minimale inférieure à un centimètre cube, et avec un poids très léger qui permet aux nœuds de rester suspendu dans l'air, si l'application l'exige.

1.4.5.5 La topologie

Les caractéristiques de déploiement aléatoire, le fonctionnement autonome, et la fréquence élevée de pannes rendent la maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs complexe. En effet plusieurs centaines de capteurs sont déployés avec une densité pouvant être supérieure à 20 nœuds par m^3 , ceci exige une bonne gestion de la maintenance de la topologie du réseau déployé. Nous examinons, dans ce qui suit, les différents problèmes liés aux topologies des réseaux de capteurs et leurs changements [44].

1) Phase de pré-déploiement et de déploiement : les nœuds capteurs peuvent être éparpillés sur le champ de captage en masse ou placés d'une manière individuelle et ceci par le biais de plusieurs moyens tels que : les jeter d'un avion, utiliser une artillerie, roquette ou missile, ou les placer nœud par nœud d'une façon manuelle ou en utilisant des robots.

Le nombre important de nœud utilisés dans un réseau de capteurs empêche leur déploiement suivant un plan soigneusement établi, cependant un schéma général pour le déploiement initial doit être conçu pour permettre, entre autres, de réduire les coûts d'installation et de faciliter l'auto-organisation des nœuds.

2) Phase de post-déploiement : après la phase de déploiement, la topologie du réseau peut subir des changements dus aux :

- changement de la position des nœuds,
- non-accessibilité à cause du brouillage ou des obstacles en mouvement,
- épuisement d'énergie,
- mal fonctionnement des nœuds.

En effet, Bien que les nœuds d'un réseau de capteurs puissent être déployés d'une manière statique, la panne matérielle constitue un évènement très commun à cause de l'épuisement d'énergie ou la destruction. Il est possible également d'avoir un réseau de capteurs avec des nœuds à forte mobilité. Par conséquent, la topologie

du réseau de capteurs est exposée fréquemment aux changements après la phase de déploiement.

3) Phase de redéploiement des nouveaux nœuds : des nœuds capteurs additionnels peuvent être installés pour remplacer ceux qui sont en panne ou bien pour répondre aux besoins des tâches assignées au réseau. Cette addition entraîne la réorganisation du réseau et le changement de sa topologie.

Une bonne gestion du réseau, faisant face au facteur de changement fréquent de la topologie d'un réseau de capteurs caractérisé par une contrainte exigeante de consommation d'énergie, doit passer obligatoirement par la conception des protocoles de routages spéciaux.

1.4.5.6 Support de transmission

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont liés via un moyen de communication sans fil, et ceci, en utilisant un support optique ou des fréquences radio. Cependant, il faut s'assurer de la disponibilité du moyen de transmission choisi dans l'environnement de captage, afin de permettre au réseau d'accomplir la totalité de ses tâches. Pour les liens de communication via les fréquences radio, les bandes ISM (Industrial scientific Medical bands) peuvent être utilisées. Ces bandes de fréquence sont employées pour assurer des communications libres de charge dans le domaine industriel, scientifique ou médical, et ceci dans la plupart des pays du monde.

L'avantage principal des bandes ISM est qu'elles sont libres de toute licence d'utilisation, elles présentent un choix immense d'allocation de fréquence et sont disponibles dans la plupart des pays du monde. Ces bandes ne sont décrites par aucun standard, mais elles offrent plus de liberté pour l'implémentation des protocoles de communication spécifiques aux réseaux de capteurs. Toutefois, cette implémentation reste toujours limitée par d'autres contraintes telles que la consommation d'énergie minimale et les interférences nuisibles avec les autres applications utilisant les mêmes bandes de fréquence.

Les ondes infrarouges représentent un autre support possible pour la communication inter-nœuds dans un réseau de capteurs. Ce type de communication est également libre de toute charge ou licence, il est robuste contre les interférences avec les appa-

reils électriques, et les unités de transmission correspondantes sont moins chères sur le marché, et plus faciles à construire. Ceci peut expliquer l'existence des ports de communication infrarouge dans la plupart des ordinateurs, téléphones portables et PDAs.

L'inconvénient majeur pour ce type de communication est qu'il exige la disponibilité permanente d'une ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur, cette contrainte rend l'utilisation de ce support dans les réseaux de capteurs un choix réticent.

Les contraintes liés aux domaines d'applications spécifiques pour les réseaux de capteurs rendent le choix du support de communication une étape critique pour la conception de ces réseaux. Par exemple, les applications liées au domaine maritime peuvent favoriser l'utilisation d'un support de transmission aqueux tel que les radiations à longueur d'onde élevée peuvent pénétrer la surface de l'eau. Tandis que les applications pour les terrains hostiles, tels que les champs de bataille, peuvent confronter un taux élevé d'erreurs et plus de brouillage et d'interférence avec l'environnement capté. Pour cela, le choix du support de transmission doit, dans ce cas, prévoir des schémas de modulation robustes pour prendre en charge des canaux de communication ayant des caractéristiques étroitement différentes [44].

1.4.5.7 La consommation d'énergie

Les nœuds capteurs étant des dispositifs microélectroniques, ils ne peuvent être équipés que par une source énergétique limitée, sur laquelle dépend la durée de vie du nœud. Par conséquent, la gestion et la conservation de l'énergie prennent une grande importance [5].

Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également. Le mal fonctionnement d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau qui consomment le minimum d'énergie.

En effet, dans les réseaux ad hoc classiques, la consommation d'énergie est un facteur important mais ne constitue pas la première considération pour les concepteurs, car les batteries sont supposées toujours remplaçable par l'utilisateur, les chercheurs ont cependant concentré leurs efforts sur les facteurs de qualité de service dans ce type de réseaux, tels que le débit de transmission et la tolérance aux pannes.

Par contre, dans les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative, qui influence directement la durée de vie du réseau en entier. Pour cela, les concepteurs peuvent au moment du développement de protocoles négliger les autres métriques de performance telle que la durée de transmission et le débit, au détriment du facteur de consommation d'énergie.

En général, l'énergie consommée dans un réseau de capteurs peut être divisée en trois domaines principaux : la capture, la communication et le traitement de données, mais il est à noter qu'un nœud peut contenir des circuits additionnels pour le codage et décodage des données, en plus de certains circuits spécifiques aux applications du réseau. Dans tous ces cas, la conception des algorithmes et protocoles du réseau est influencé largement par l'énergie consommée par ces circuits [44].

1.4.6 Domaines d'application

Un réseau de capteurs sans fil est constitué de composants autonomes intégrés, connectés ensemble par liaisons radiofréquences, capables de mesurer des paramètres physiques dans des environnements variés et de se coordonner en vue de remplir une fonction applicative spécifique.

Cette nouvelle approche de contrôle et de suivi trouve de nombreuses applications, dans des domaines variés. Dans le domaine agricole, on peut imaginer des réseaux de capteurs surveillant des données liées à la météo, à la surveillance des cultures, notamment les maladies, l'humidité, la pollution, etc. Dans le domaine de la construction et du bâtiment, on peut penser à des systèmes de surveillance du vieillissement des édifices. Dans le domaine des transports, notamment le transport routier, des réseaux de capteurs pourraient diffuser des informations de portée locale sur les conditions de circulation, les alertes, et permettre d'améliorer la sécurité. Dans le domaine militaire, des suggestions d'applications ont été données, par exemple pour

le suivi des mouvements de l'ennemi, il peut être intéressant de déployer un réseau de capteurs qui réaliserait la surveillance en "arrosant" une zone de capteurs à l'aide d'avions ou d'hélicoptères.

On peut aussi penser à la surveillance chimique et bactériologique. Dans le domaine de la sécurité civile, les réseaux de capteurs pourraient jouer un rôle primordial pendant des catastrophes naturelles, notamment après des séismes : il pourrait être intéressant de déployer des réseaux de capteurs pour détecter la présence de vie humaine, de fuites de gaz ou autre pour secourir ou protéger les populations. Enfin, certains ont émis l'idée de déployer des réseaux de capteurs sur des planètes du système solaire, comme un moyen relativement simple à mettre en œuvre pour récupérer diverses données. Le cadre applicatif privilégié est celui des capteurs nécessitant un déploiement important en nombre d'unités, impliquant une réduction importante des coûts et de l'énergie électrique consommée [18].

1.4.7 Scénarios typiques

A partir des applications présentées précédemment, l'objectif est d'extraire des mécanismes réseau de base dans le but de concevoir un système répondant aux besoins. L'approche est en effet différente de l'utilisation d'une norme réseau pré-existante, sans tenir compte des contraintes aussi spécifiques que celles qui peuvent être trouvées dans le domaine des réseaux de capteurs.

Quelques travaux [32] [83] [38] ont exposé leur analyse des mouvements d'information dans des réseaux de capteurs. On peut alors distinguer plusieurs types de réseaux de capteurs.

1.4.7.1 Echantillonnage périodique avec rapatriement automatique

Le premier scénario est un réseau fixe de surveillance dans lequel les capteurs communicants n'ont aucun rôle d'interprétation des données. Les décisions à prendre quant aux valeurs de mesure des capteurs sont calculées au niveau de la station de base exclusivement. Le schéma de la figure suivante illustre ce type d'application.

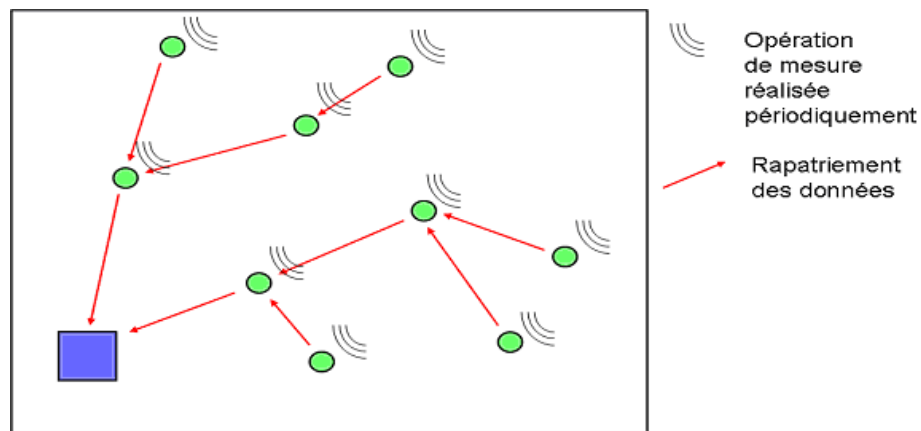


FIG. 1.6 – Echantillonnage périodique avec rapatriement automatique.

Chaque capteur a les fonctions suivantes :

- le maintien des informations d'autopositionnement,
- le maintien des informations de routage,
- un processus périodique qui effectue des mesures à intervalle constant,
- une génération de rapport de mesure systématique à destination de la station de base se diffusant en mode multi-sauts dans l'hypothèse où la station de base est hors de portée de communication.

1.4.7.2 Surveillance à intervalle de temps constant avec rapatriement en cas de réalisation d'une condition particulière

Un second scénario consiste pour le réseau de capteurs à réaliser des mesures en permanence, associé à un filtrage correspondant à une interprétation des données mesurées localement. Suite à ce traitement, chaque capteur peut prendre l'initiative de générer un message à destination de la station de base. Ce message peut être interprété, la plupart du temps, comme un message d'alerte. Ce type de fonctionnement applicatif est assez commun et utilisé dans des applications d'alertes tels que la détection d'incendie ou encore la détection de présence. Chaque capteur doit réaliser :

- le maintien des informations d'autopositionnement,
- le maintien des informations de routage,
- un processus périodique qui effectue des mesures à intervalle constant,
- un traitement de filtrage qui interprète les données mesurées,

- des générations d’alerte, le cas échéant, en direction de la station de base.

Ce type d’application peut être représenté par la figure suivante :

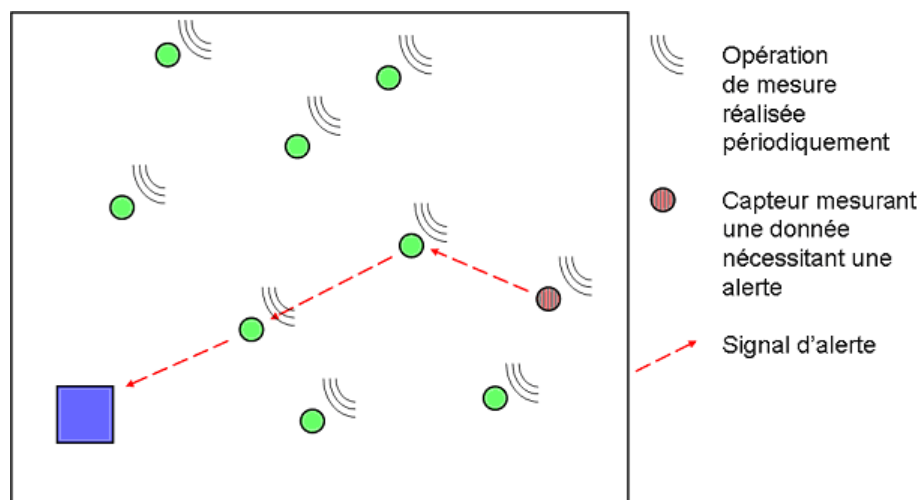


FIG. 1.7 – Surveillance périodique avec rapatriement en cas de réalisation d’une condition particulière.

1.4.7.3 Schéma d’interrogation ponctuelle initiée par la station de base

Dans un troisième scénario, les mesures ne sont plus effectuées à l’initiative des capteurs, mais découlent d’un ordre spécifique émis par la station de base. Les événements de mesures ne sont pas initiés directement par les capteurs, mais déclenchés exclusivement par la réception d’ordres en provenance de la station de base. Cette situation est celle qui permet de limiter le plus la consommation d’énergie ainsi que l’utilisation du canal dans le cas où les requêtes sont suffisamment rares. Chaque capteur doit exécuter :

- le maintien des informations d’autopositionnement,
- le maintien des informations de routage,
- une tâche de fond capable de recevoir les ordres de mesures de la part de la station de base,
- une mesure, ponctuellement, à la réception d’un ordre de mesure,
- un rapport de mesure, ponctuellement, à destination de la station de base en employant un schéma de propagation multi-sauts.

La figure suivante illustre ce comportement :

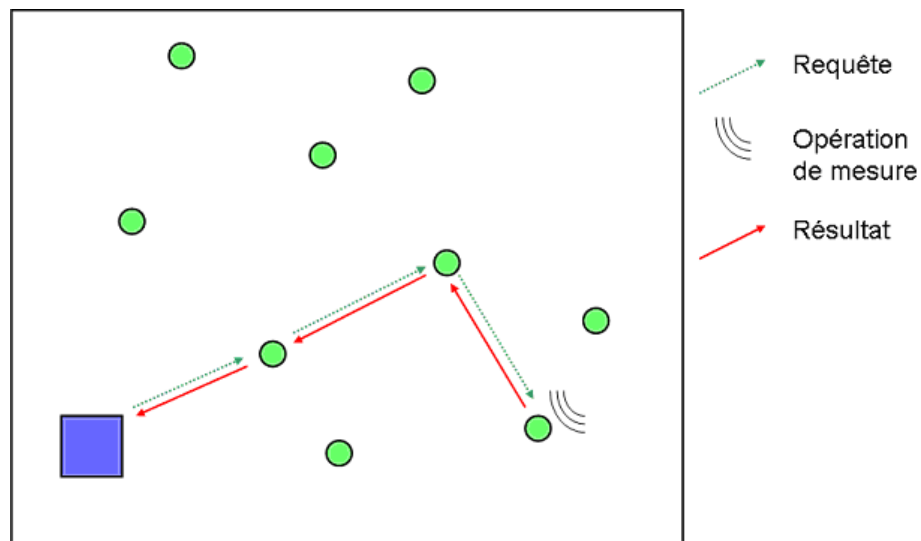


FIG. 1.8 – Surveillance par interrogation ponctuelle initiée par la station de base.

1.4.7.4 Applications hybrides

Ces cas de figures peuvent éventuellement coexister, voire même se combiner. Par exemple, de nombreux travaux sur les applications mettent en évidence des fonctionnements sous forme de clusters. Dans ces situations, les capteurs se regroupent par paquets, le critère de regroupement étant la proximité géographique. Une hiérarchie peut s'établir au sein même de ces clusters pour tenter de cumuler les avantages des différentes stratégies, l'un des capteurs du cluster jouant en quelque sorte le rôle de station de base locale.

En procédant par des techniques de ce genre, on peut par exemple considérer que les capteurs emploient une technique d'échantillonnage périodique avec rapatriement automatique vers la tête de cluster, les têtes de clusters employant à leur échelle une technique de surveillance à intervalle constant avec rapatriement vers la station de base en cas de réalisation d'une condition particulière.

1.4.7.5 Position de la station de base

Toutes ces catégories applicatives peuvent éventuellement être modulées par des critères supplémentaires liés à la station de base, ou plutôt aux stations de bases, à savoir leur nombre au sein du réseau et leur position relative par rapport aux capteurs du réseau. La situation de la station de base à une position centrale dans le réseau est favorable, puisque la distance moyenne entre les capteurs et la station

de base sera minimisée, ce qui permet également de minimiser le nombre d'étapes moyen pour des transferts entre la station de base et les capteurs dans les sens ascendant et descendant. De plus, une position centrale de la station de base permet une meilleure répartition de l'utilisation du canal.

Cependant, dans de nombreux cas, la station de base se retrouve plutôt en périphérie du réseau ce qui a des conséquences sur les performances globales et sur l'énergie globalement dépensée.

1.5 Comparaison entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs

La réalisation des différentes applications liées aux réseaux de capteurs requière l'utilisation des techniques employées dans les réseaux ad hoc sans fil. Cependant, la multitude de protocoles proposés pour les réseaux ad hoc traditionnels, ne peut être directement appliquée aux réseaux de capteurs à cause des caractéristiques uniques de ces derniers, et les exigences imposées par leurs applications. Nous distinguons plusieurs critères faisant la différence entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc conventionnels, entre autres [59] [5] :

- Le nombre de nœuds capteurs dans un réseau de capteurs peut être plus grand que le nombre de nœuds dans un réseau ad hoc.
- Les nœuds capteurs sont déployés en masse.
- Les nœuds capteurs sont plus exposés aux pannes.
- Les nœuds capteurs utilisent principalement le paradigme de communication broadcast, tandis que la plupart des réseaux ad hoc sont basés sur la communication point à point.
- Les nœuds capteurs sont plus limités par les contraintes d'énergie, de capacité de calcul et de mémoire.
- Les nœuds capteurs peuvent ne pas avoir un identificateur global (ID) en raison du grand nombre de nœuds

1.6 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur le concept des environnements mobiles et l'utilisation de la technologie de communication sans fil. L'évolution connue récemment dans le domaine des technologies micro-électro-mécaniques et des communications sans fil a permis l'apparition d'un nouveau type de réseau classé parmi les systèmes de communication Ad hoc, ce sont les réseaux de capteurs que nous avons introduits dans ce chapitre. Nous avons montré les caractéristiques principales qui les distinguent des réseaux Ad Hoc conventionnels, en plus de leurs applications et les facteurs devant être pris en considération au moment de leur conception.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes approches de conception de la majorité des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sans fil et définir les différents mécanismes de conservation d'énergie dans ce type de réseaux.

2

Routage et économie d'énergie dans les RCSFs

2.1 Introduction

Le développement des protocoles de routage spécifiques aux réseaux de capteurs a attiré une grande part d'intention parmi les chercheurs dans le domaine. Ceci car, d'une part, ces protocoles peuvent varier suivant les différentes approches de routage, et d'autre part, les solutions de routage proposées dans le cas des réseaux ad hoc ne sont pas applicables directement dans les réseaux de capteurs. Bien que l'objectif principal reste le même, c'est à dire qu'il s'agit de trouver la façon la plus simple d'acheminer des paquets de données d'une source à une destination, le routage dans les réseaux de capteurs tolère une certaine négligence des paramètres de qualité de service en ne tenant compte que de la minimisation de la consommation d'énergie. En effet, une problématique majeure [1] dans les réseaux de capteurs est la maîtrise de l'énergie consommée par chaque nœud capteur. Les nœuds capteurs sont alimentés par une batterie dont la capacité est limitée et qui n'est pas rechargeable. Aussi, pour qu'un réseau de capteurs ait une longévité maximale, il faut

que la consommation d'énergie soit prise en compte à tous les niveaux de l'architecture réseau. Comme les protocoles mis en œuvre doivent en particulier intégrer cette contrainte, beaucoup de travaux dans le domaine des réseaux de capteurs ont proposé de nouveaux protocoles de communication (contrôle de l'accès au médium de communication, routage, etc).

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu les défis du routage dans les réseaux de capteurs, puis décrire les différentes approches de routage dans ce type de réseaux et citer quelques protocoles pour chaque approche. Enfin, nous terminerons par la présentation des différents mécanismes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

2.2 Les Défis du routage dans les réseaux de capteurs

En plus des facteurs de consommation d'énergie, tolérance aux pannes, topologie et scalabilité, préalablement discutés dans le chapitre précédent, l'opération du routage dans les réseaux de capteurs est contrainte par un ensemble d'exigences spécifiques, pour qu'une communication efficace puisse être assurée, parmi lesquelles nous citons :

2.2.1 Le déploiement des capteurs

Suivant le type d'application, le mode de déploiement des capteurs peut être déterministe ou aléatoire. Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les données sont toujours acheminées via une route pré-déterminée et fixe. Cependant, si le déploiement est aléatoire, dit aussi auto-organisé, les nœuds capteurs sont dispersés aléatoirement, créant ainsi une infrastructure ad hoc. Dans ce cas, si la distribution qui en résulte n'est pas uniforme, le recours à une architecture de groupe optimale s'avère nécessaire afin de permettre une meilleure connectivité, ainsi que des opérations plus efficaces en consommation d'énergie [44].

2.2.2 Modèle de livraison de données

Le modèle de renvoi des données captées constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Ce modèle peut, suivant l'application, être continu, orienté évènement, orienté requête, ou hybride [88] [40]. Le modèle de renvoi continu est le mieux adapté aux applications qui nécessitent des rapports périodiques sur l'environnement surveillé. Pour cela, chaque nœud allume ses dispositifs de captage et de transmission d'une manière périodique, capte son environnement puis transmet les résultats dans des intervalles de temps réguliers. Par contre, dans le modèle de renvoi orienté évènement ou requête, les nœuds doivent réagir d'une manière immédiate à un changement brusque dans la valeur de l'attribut capté, ou à une requête générée par le nœud puits. Ce dernier modèle est convenable pour les applications où le temps de réponse des capteurs peut être critique. Une combinaison des trois modèles est également possible, le mode de transmission des rapports est dès lors appelé hybride.

2.2.3 Hétérogénéité des nœuds/liens

Plusieurs études ont supposé qu'un réseau de capteurs est constitué de nœuds homogènes ayant les mêmes capacités en terme de calcul, transmission et énergie disponible. Cependant, et suivant l'application, un nœud capteur peut jouer des rôles particuliers tel que l'agrégation, et le relayage avec un autre réseau, en plus du captage en même temps, et avoir ainsi, des capacités spécifiques.

Par exemple, au moment où plusieurs travaux sur la notion de groupe dans les algorithmes de routage choisissent les chefs de groupes parmi les capteurs déployés, on trouve que certains protocoles proposés dans la littérature exigent qu'un chef de groupe doit être plus puissant que les capteurs normaux en terme d'énergie, bande passante et mémoire ; dans ces cas, le chef de groupe est le seul responsable de l'agrégation et la transmission des données captées vers le nœud puits.

L'existence d'ensembles hétérogènes de capteurs fait surgir plusieurs issues techniques liées au routage de données. En effet, certaines applications peuvent nécessiter une mixture diverse de capteurs qui surveillent la température, l'humidité et la pression dans l'environnement, détectent le mouvement d'objets au moyen de signatures acoustiques et captent en même temps des images ou des vidéo sur les

objets en mouvement. La lecture des informations générées par ces capteurs, dans ce cas, peut être alors avec des taux différents, sujet à des contraintes de qualité de service différentes, et suivant des modèles différents de livraison de données. Ceci rend l'opération de routage plus contraignante [44].

2.2.4 Qualité de service

Dans certaines applications, les données captées doivent être acheminées au destinataire durant une certaine période, à compter du moment de leur acquisition, autrement, ces informations ne seront plus utiles. Par conséquent, la garantie d'une latence limitée dans les délais de transmission de bout en bout constitue une contrainte supplémentaire pour ce genre d'applications. Il est à noter, cependant, que dans plusieurs autres applications, le facteur de conservation d'énergie qui est directement lié à la durée de vie globale du réseau constitue une contrainte plus importante relativement à la qualité des données transmises. Pour cela, et en cas d'épuisement d'énergie, le réseau peut être amené à réduire la qualité des résultats en vue de minimiser la dissipation d'énergie et prolonger ainsi la durée de vie du réseau. Ceci dit, les protocoles garantissant la qualité de service doivent être également efficaces en consommation d'énergie afin de prendre en charge ce cas de figure [44].

2.2.5 Agrégation/fusion de données

L'agrégation de données peut être perçue comme un ensemble de méthodes automatisées qui combinent les données provenant de différents nœuds capteurs en un ensemble d'informations significatives.

Dans cette technique, un réseau de capteurs est perçu comme un arbre multicast renversé, où les données provenant des différents nœuds capteurs sont agrégés si les attributs du phénomène sont à peu près identiques quand elles atteignent le même nœud de routage sur le chemin qui mène à la station de base.

Par exemple, dans la figure 2.1, le nœud capteur E agrège les données des nœuds A et B tandis que le nœud capteur F agrège les données des nœuds C et D.

La forme la plus simple que peut prendre une fonction d'agrégation est la suppression des messages dupliqués. Mais elle peut également être une fonction min ou max, ou n'importe quelle fonction à plusieurs entrées.

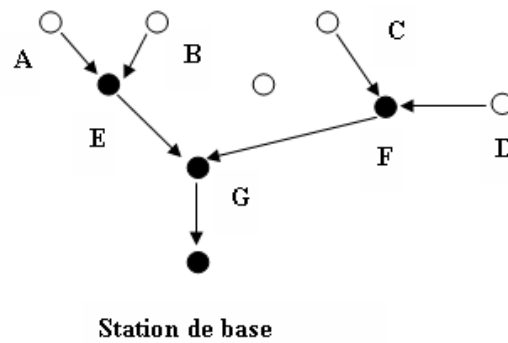


FIG. 2.1 – Agrégation de données

L'agrégation de données est également faisable par le biais de techniques de traitement de signal, l'opération est appelée dès lors fusion de données. Dans ce cas, le nœud essaye de produire un signal plus précis en réduisant les bruits et en utilisant certaines techniques telles que "beamforming" afin de combiner les signaux entrants [67].

2.2.6 Dynamicité du réseau et mobilité

Tout au long de ce chapitre nous remarquerons que la plupart des architectures considérées dans les protocoles de routage préalablement développés supposent que les nœuds capteurs sont stationnaires, cependant la mobilité des capteurs ainsi que les nœuds puits est nécessaire dans plusieurs applications [44]. Router les messages de/vers un nœud en mouvement est plus contraignant, car le facteur de stabilité de la route choisie devient un facteur d'optimisation important, en plus de l'énergie consommée, la bande passante disponible, etc.

De plus, le phénomène capté peut également être, suivant l'application, statique ou dynamique. Par exemple, il est dynamique dans les applications de détection/traque de cibles, et statique pour les réseaux de surveillances de forêts généralement utilisés pour la prévention contre les incendies.

Surveiller des événements statiques permet au réseau de travailler avec un mode réactif qui consiste simplement à générer un trafic relativement faible, cependant, un événement dynamique nécessite dans la plupart des applications l'envoi de rapports périodiques, et donc, la génération d'un trafic considérable à router vers les nœuds puits.

2.3 Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense dans un champ de captage. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage spéciaux basés sur la communication multi-sauts sont nécessaires entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau. Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les fonctions des protocoles, l'établissement des routes et l'initiateur de la communication.

La figure suivante montre la classification des différentes approches de routage dans les RCSFs selon les critères cités précédemment :

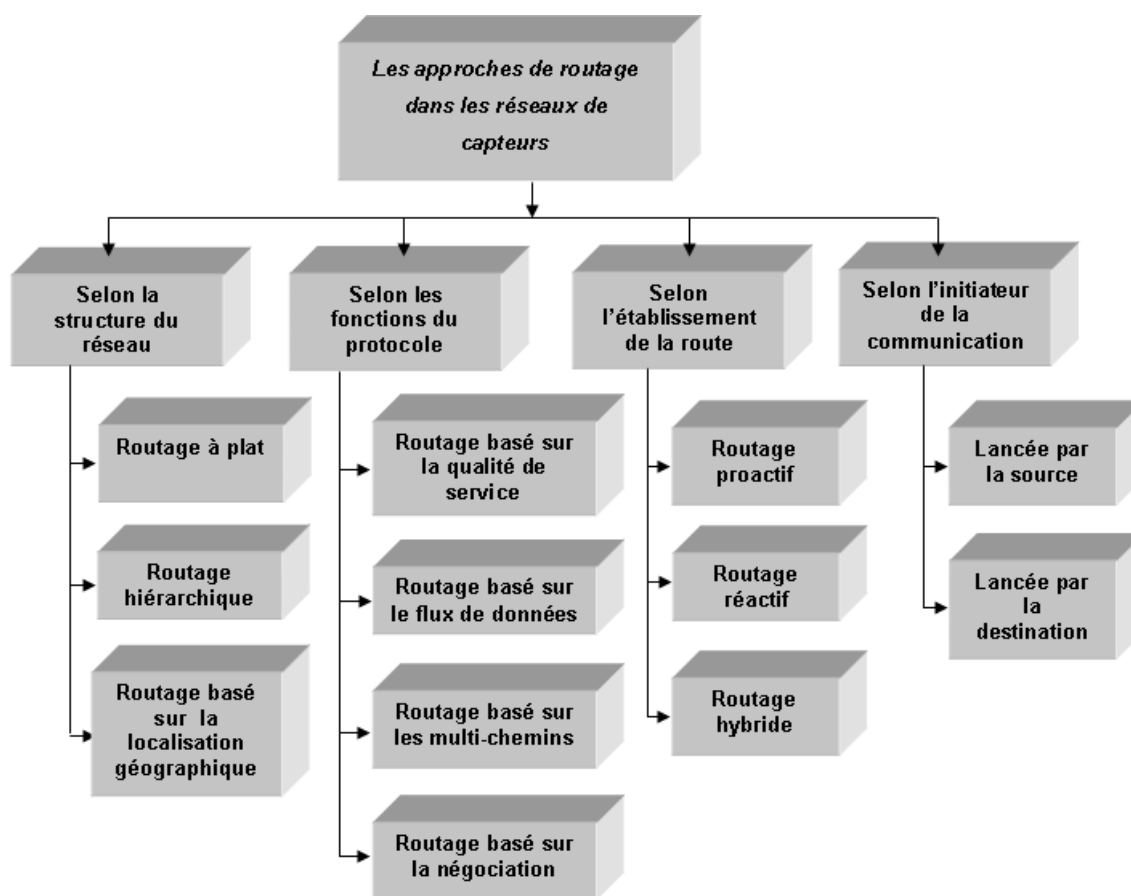


FIG. 2.2 – Les approches de routage dans les réseaux de capteurs

2.3.1 Classification selon la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles à plat (Flat based routing), protocoles hiérarchiques (Hierarchic based routing/Clustering based routing) et les protocoles basés sur la localisation géographique (Location based routing).

2.3.1.1 Routage à plat

La première catégorie des protocoles de routage est celle des protocoles de routage à plat multi-sauts (multihop flat routing) dont les protocoles sont basés sur le principe centrés données "data-centric" [46] où tous les nœuds ont le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre de nœuds, il n'est pas faisable d'affecter un identificateur global à chaque nœud. Pour pallier cette lacune, un système de dénomination par attribut (attribute values) est nécessaire pour spécifier les propriétés des données [12] [38] [19] [73] [75] [71] [3] [88] [34].

SPIN (Sensors Protocols for Information via Negotiation) [34] est considéré comme le premier protocole centré données ayant adopté un mécanisme de négociation pour éliminer la redondance des données reportées, et par conséquent, préserver l'énergie des nœuds. Un peu plus tard, DD (Directed Difusion) [38] a été développé, et est devenu le protocole de référence dans le domaine du routage centré données. Par la suite une multitude de protocoles a été proposée en se basant sur DD, ou en utilisant des concepts similaires. Dans le reste de cette section, nous donnerons un résumé de quelques protocoles et mettrons l'accent sur leurs avantages, limites et performances.

1) Flooding

La technique du flooding (Inondation) [5] est un mécanisme classique pour transmettre par relais des données dans les réseaux de capteurs. Dans cette approche, chaque nœud recevant un paquet de données le diffuse à tous ses nœuds voisins, jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint (inondation de tout le réseau).

Le flooding est une technique réactive qui ne nécessite pas une maintenance coûteuse de la topologie du réseau, ni des algorithmes complexes pour la découverte des

routes, mais elle présente plusieurs inconvénients tel que : l'implosion, le chevauchement et l'ignorance des ressources d'énergie.

2) Gossiping

Le Gossiping [6] est une version légèrement améliorée du Flooding où un nœud recevant un message ne le diffuse pas à tous ses voisins, mais il le transmet à un seul sélectionné aléatoirement, jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Bien que cette approche évite le problème d'implosion en ayant une seule copie du message au niveau de chaque nœud, elle prend beaucoup plus de temps pour propager les messages dans tout le réseau.

3) SPIN (Sensors Protocols for Information via Negotiation)

Dans [34] et [35], les auteurs ont proposé une famille de protocoles adaptatifs appelés SPIN. Cette famille de protocoles adaptatifs a été proposée pour palier au problème d'ignorance de ressources posé dans le protocole Flooding, en utilisant la négociation et l'adaptation aux ressources disponibles. Le protocole SPIN utilise trois types de messages :

- ADV : quand un nœud a une donnée à envoyer, il avertit ses voisins en utilisant ce message.
- REQ : un nœud envoie ce message s'il désire recevoir une donnée.
- DATA : ce message contient la donnée avec un en-tête contenant la méta-donnée.

Avant d'envoyer un message de type DATA, le nœud capteur diffuse un message ADV qui contient le descripteur, c'est-à-dire la méta-donnée de la donnée DATA à envoyer. Il est à noter qu'il n'existe pas de format standard pour les méta-données employées, ces dernières sont supposées spécifiques à chaque application. Si le nœud voisin est intéressé par la donnée, il envoie un message de type REQ pour DATA, cette dernière est par la suite envoyée à ce nœud et le nœud capteur voisin répète ce processus. De cette manière, seuls les nœuds capteurs qui sont intéressés par la donnée du message transmis auront une copie.

La famille SPIN inclut beaucoup de protocoles. Ces derniers sont SPIN-1, SPIN-2, SPIN-BC, SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-RL...etc.

L'un des avantages majeurs du protocole SPIN dérive de son traitement localisé de l'information, où chaque nœud n'a besoin de connaître que ses voisins immédiats uniquement, ceci permet de préserver les mêmes performances lors d'un changement fréquent de la topologie du réseau.

4) DD (Directed Diffusion)

Directed diffusion [38] est considérée comme un protocole de référence dans le domaine du routage centré données. Il comprend quatre opérations principales :

- *Dissémination d'intérêt* : dans cette première étape, la station de base réclame les données requises par l'envoi de son intérêt sous forme de requête vers les nœuds du réseau.
- *Propagation des données* : les nœuds capteurs sources intéressés par une requête envoient leurs premiers paquets de l'information, avec un taux de transmission faible, pour explorer les chemins possibles entre les nœuds source et la station de base.
- *Renforcement des routes* : quand la station de base reçoit les premiers paquets envoyés par les nœuds sources, elle envoie le message original d'intérêt à travers le chemin sélectionné avec un taux de transfert plus élevé.
- *Maintenance des routes* : quand un chemin employé devient défaillant, une nouvelle route alternative doit être identifiée. Pour cela, le protocole réinitialise la phase de renforcement par une recherche parmi les autres routes qui envoient les données avec un taux d'émission faible.

DD profite de tous les avantages du routage centré données, où toutes les communications sont voisin à voisin, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un adressage global. De plus, chaque nœud utilise des mécanismes de cache de données et d'agrégation pour permettre une optimisation considérable en terme de consommation d'énergie et délai de transmission.

Ceci dit, le protocole reste sensible à plusieurs facteurs qui influencent sa perfor-

mance, tel que l'établissement du critère de choix utilisé pour le renforcement des chemins et la distinction entre les différents nœuds sources d'évènement, quand plusieurs sont impliqués par le même intérêt.

5) GBR (Gradient Based Routing)

Le protocole GBR [73] est une autre variante de la diffusion dirigée. L'idée principale derrière GBR est de mémoriser le nombre de sauts quand l'intérêt est diffusé à travers tout le réseau. Chaque nœud peut calculer un paramètre appelé hauteur du nœud, qui est le nombre minimum de sauts pour atteindre la station de base. La différence entre la hauteur d'un nœud et celle de son voisin est considérée comme le gradient sur ce lien. Un paquet est expédié sur le lien ayant le plus grand gradient. GBR utilise certaines techniques auxiliaires telles que l'agrégation des données et la répartition du trafic afin de diviser uniformément le trafic sur le réseau. Quand un nœud relais est traversé par des voies multiples, il peut combiner les données selon une certaine fonction d'agrégation. Dans GBR, trois techniques de diffusion de données ont été développées :

- *Le schéma stochastique* : quand il y a deux liens ou plus ayant le même gradient, l'émetteur choisit aléatoirement l'un d'eux.
- *Le schéma basé sur la consommation d'énergie* : quand l'énergie résiduelle d'un nœud chute en dessous d'un certain seuil, ce dernier augmente sa "hauteur" en vue de dissuader les autres nœuds de lui envoyer les données à router vers la station de base.
- *Le schéma basé flux* : l'idée est de dévier les nouveaux flux de données loin des nœuds qui appartiennent déjà à un chemin utilisé par un autre flux.

L'objectif principal de ces techniques est d'obtenir une distribution équilibrée du trafic dans le réseau et ainsi augmenter la durée de vie du réseau.

2.3.1.2 Routage hiérarchique

Le routage hiérarchique ou le routage par groupement (cluster-based), initialement proposé dans les réseaux câblés, est une technique bien connue avec des fonc-

tionnalités qui résolvent les problèmes liés à la surcharge de la station de base due à la densité du réseau et qui augmentent l'efficacité de communication en impliquant les nœuds dans une communication multi-sauts au sein d'un seul groupe. De plus, le concept du routage hiérarchique est également utilisé pour économiser efficacement l'énergie dans le réseau.

Dans une architecture hiérarchique, les nœuds à énergie élevée peuvent être utilisés pour traiter et envoyer l'information tandis que les nœuds à énergie réduite peuvent être employés pour exécuter la capture à proximité de la cible. Cependant, ce concept se base sur la création de groupes (clusters) et l'assignation de tâches, comme l'agrégation et la fusion de données, au leader de chaque groupe (cluster-head) [33] [89] [52] [54] [91] [45] [79] [50] [51] [13].

Nous présentons dans ce qui suit brièvement quelques protocoles existants pour réaliser le regroupement de capteurs.

1) LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Le protocole LEACH [33] prend pour hypothèse l'égalité des énergies résiduelles des capteurs lors du démarrage de fonctionnement du réseau. La vie du réseau est alors segmentée en rondes caractérisées par un choix de routeurs de grappes différents. Lors d'une ronde, les capteurs n'ayant pas été élus routeurs se rattachent au capteur le plus proche :

- *Election probabiliste des routeurs* : choisir un ratio P de routeurs parmi tous les capteurs du réseau. Lors de chaque ronde r , la phase d'initialisation permet l'élection du routeur : chaque capteur génère un réel pseudo-aléatoire a compris entre 0 et 1 et se détermine routeur si et seulement si a est inférieur à un seuil $T(i)$ défini par la formule suivante :

$$T(i) = \begin{cases} P/(1 - P(r \bmod (1/P))) & \text{Si } i \text{ n'a pas été élu routeur durant les } 1/P \\ & \text{dernières rondes ;} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

La particularité de LEACH réside donc dans la non nécessité de communication pour l'élection des routeurs. Il est cependant nécessaire de définir manuellement un ratio de routeur P parmi les routeurs.

- *Choix du routeur d'un capteur* : lors de chaque phase, les routeurs qui se sont élus diffusent leur résultat en utilisant un protocole de gestion des collisions. En supposant la puissance d'émission de l'annonce constante pour tous les routeurs, un capteur sélectionne pour routeur celui dont le signal lui parvient avec le plus de puissance. Le capteur ayant choisi son routeur, lui communique son choix. Au terme de la phase d'initialisation de la ronde, chaque routeur auto-élu a donc connaissance de l'ensemble des capteurs qu'il gère.
- *Elaboration d'un plan de communication* : le routeur d'une grappe élabore un plan de communication qui consiste à éviter les collisions intra-grappe par allocation de quanta de temps de transmission à chaque capteur. Les capteurs sont informés du plan de communication élaboré par le routeur : ils ne peuvent émettre leurs données que lors des quanta qui leur sont réservés.

2) PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Informations System)

PEGASIS [52] est un autre protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs, il a été proposé comme amélioration du protocole LEACH. Dans ce protocole, un nœud peut seulement communiquer avec son voisin le plus proche, et doit attendre son tour pour pouvoir transmettre à la station de base.

La motivation principale de ce protocole, consiste à prolonger la durée de vie des nœuds capteurs et réduire la bande passante consommée en utilisant la collaboration locale entre les nœuds et en tolérant la défaillance des nœuds capteurs.

Initialement, le nœud capteur doit trouver son voisin le plus proche par l'envoi d'un signal et l'atténuation graduelle de ce dernier, jusqu'à ce qu'il soit reçu par un seul nœud. Les données captées sont transmises à la station de base en utilisant la fusion qui combine deux paquets de données ou plus et les envoie dans un seul paquet, ce qui est similaire au protocole LEACH.

L'idée clef de PEGAGIS est de former une chaîne entre les nœuds d'une telle façon que chaque nœud envoie et reçoit les données seulement de son voisin le plus proche. Les données fusionnées sont transmises à la station de base par un nœud désigné parmi les membres de la chaîne, les autres nœuds prendront leurs tours pour accomplir cette tâche, réduisant ainsi la quantité d'énergie consommée par round.

3) HEED (A Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks)

HEED [92] est un protocole basé sur LEACH avec quelques différences. En particulier pour HEED, une fonction de coût est introduite pour chaque capteur et est annoncée aux voisins. Le choix d'un routeur ne s'effectue donc plus par la sélection du routeur dont la puissance de réception du signal est la plus forte : on choisit le routeur dont la fonction de coût est minimale. La fonction de coût peut par exemple être le nombre de voisins d'un nœud pour distribuer la charge sur les capteurs (ou l'inverse du nombre de voisins pour obtenir des grappes denses).

Une méthode probabiliste avec itération est également utilisée pour l'auto-élection des routeurs, mais avec considération de l'énergie résiduelle de chaque capteur. A la première itération, pour chaque capteur i le seuil d'éligibilité est fixé à :

$$CH_{prob}^i = \max(C_{prob} \times (E_i / E_{max}), p_{min})$$

Où C_{prob} est le ratio recherché de routeurs sur le réseau, E_i l'énergie résiduelle du capteur i et p_{min} une probabilité minimale d'éligibilité pour assurer la terminaison de l'algorithme (pour éviter un nombre infini d'itérations). A chaque itération, CH_{prob} est multiplié par 2 (pour atteindre un maximum de 1 où le capteur est garanti d'être élu routeur).

Des tests réalisés par les concepteurs de HEED [92] montrent que pour certaines situations, l'autonomie d'un réseau de capteurs (temps avant l'indisponibilité du premier capteur par insuffisance d'énergie) est plus que doublée par rapport à LEACH. A première vue, HEED s'avère plus adapté, par la prise en compte de l'énergie résiduelle des capteurs, pour des réseaux de capteurs d'énergie résiduelle hétérogène.

4) WCA (Weighted Clustering Algorithm)

WCA [20], contrairement à LEACH, procède au choix des routeurs par la diffusion de scores d'éligibilité pour chaque capteur : les capteurs doivent donc communiquer pour pouvoir aboutir au choix des routeurs. Ce score est calculé suivant divers critères pondérables.

– *Calcul du score d'éligibilité* : le protocole WCA introduit les critères suivant afin d'établir un score d'éligibilité pour chaque capteur du réseau :

a) L'optimisation du nombre de capteurs (degré) géré par chaque routeur : chaque capteur est capable de gérer un nombre limité δ de capteurs en tant que routeur. On calcule donc pour chaque capteur i la valeur $\Delta_i = |V_i - \delta|$ où V_i est le nombre de capteurs dans le voisinage de i (on cherche à minimiser Δ_i pour un routeur).

b) Le temps cumulatif d'occupation P_i de la charge de routeur pour chaque capteur i : l'algorithme WCA fait l'objet de plusieurs exécutions au cours de la vie du réseau. On comptabilise ainsi pour chaque capteur le temps passé à assumer la charge de routeur depuis l'installation du réseau. On cherche à minimiser ce temps lors du choix d'un routeur lors de l'exécution de l'algorithme.

c) La somme des distances $D_i = \sum_{j \in V_i} \text{distance}(i,j)$ d'un capteur avec tous ses voisins : la minimisation de cette valeur est recherchée afin de diminuer les coûts de communication du routeur avec les capteurs qu'il gère.

d) La vitesse moyenne M_i du capteur i sur les T dernières secondes à titre de quantification du mouvement du capteur : la minimisation de la vitesse moyenne du capteur est recherchée afin de privilégier des capteurs relativement fixes à la désignation de routeur.

Toutes les valeurs citées précédemment doivent être minimisées et un score d'éligibilité W_i est calculé à partir de celles-ci pour chaque capteur i par pon-

dération de ces valeurs :

$$W_i = w_1 \Delta_i + w_2 D_i + w_3 M_i + w_4 P_i$$

- *Diffusion des scores d'éligibilité et élection des routeurs* : l'élection des routeurs est assurée par un processus itératif : dans un premier temps, l'ensemble des capteurs communiquent leur score d'éligibilité. Le score d'éligibilité de chaque capteur est diffusé sur tout le réseau (par inondation) : chaque capteur constitue un vecteur \vec{W} de scores d'éligibilité. A l'issue de cette itération initiale, chaque capteur connaît le capteur de score d'éligibilité minimal. Ce dernier est élu routeur et ses voisins s'y rattachent (dans la limite de δ). Le processus est répété pour les itérations suivantes avec les capteurs non-rattachés : W_i est mis à jour en ignorant les capteurs attachés, les scores mis à jour sont diffusés sur le réseau.

2.3.1.3 Routage basé sur la localisation géographique

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisqu'il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en terme d'énergie. Par exemple, si la région à servir est connue (en utilisant la localisation des nœuds capteurs) les requêtes seront alors envoyées seulement à cette région particulière, ainsi le nombre de transmissions sera réduit de manière significative [82] [86] [69] [93].

1) GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

GAF est un protocole de routage, basé sur la localisation géographique, efficace en consommation d'énergie [46]. Ce protocole a été initialement destiné aux réseaux ad hoc, néanmoins il peut être appliqué aux réseaux de capteurs. L'idée principale de GAF consiste à éteindre l'ensemble des nœuds inutiles dans le réseau sans affecter le

niveau de fidélité de l'opération du routage. Pour cela, le protocole forme une grille virtuelle à travers le champ de captage, où chaque nœud utilise le service GPS pour pouvoir se positionner, et s'associer à un point particulier de la grille construite. Les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en terme de coût lié au routage des paquets. Cette équivalence est par la suite exploitée pour pouvoir mettre en veille certains nœuds associés au même point de la grille afin d'optimiser l'énergie consommée. Ceci dit, GAF peut substantiellement augmenter la durée de vie du réseau au fur et à mesure que le nombre de nœuds augmente.

2) GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)

Dans [93], les auteurs ont suggéré l'utilisation des informations géographiques pendant la dissémination des requêtes vers la région appropriée. En effet, les auteurs ont exploités le fait que ces requêtes incluent souvent des attributs géographiques qui définissent cette région. Ce protocole nommé GEAR utilise des heuristiques efficaces en consommation d'énergie, basées sur les informations de localisation pour la sélection des voisins à travers lesquels les paquets sont routés vers la région désirée. Dans GEAR, chaque nœud maintient une valeur d'apprentissage ainsi qu'une autre valeur estimée du coût nécessaire pour atteindre une destination donnée. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle du nœud et la distance qui le sépare de la destination, tandis que la valeur d'apprentissage est un raffinement du coût estimé qui permet de router les données autour des trous qui apparaissent dans le réseau. Ces derniers surviennent lorsque les nœuds sont plus loin les uns des autres ou dans le cas où il existe des nœuds qui ne possèdent pas l'énergie suffisante pour participer au routage. A chaque fois qu'un nœud reçoit un paquet, la valeur du coût d'apprentissage est transmise à tous les nœuds voisins du récepteur, y compris l'émetteur, afin d'ajuster la route pour des communications ultérieures.

Le protocole GEAR a été comparé à un protocole similaire appelé GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks) [43]. Ce protocole, qui ne tient pas compte de la consommation d'énergie, est considéré comme étant l'un des premiers travaux dans le domaine du routage géographique, il utilise les graphes planaires pour résoudre le problème de trou. Pour cela, les paquets suivent le périmètre du graphe planaire en vue de trouver une route qui contourne le trou. GEAR, contrairement

à GPSR, améliore nettement la quantité d'énergie nécessaire pour l'établissement des routes et présente également de meilleures performances en terme de perte de paquets [93].

2.3.2 Classification selon les fonctions des protocoles

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (Quality of Service "QoS" based routing), routage basé sur le flux de données dans le réseau (Network flow based routing), routage basé sur les multi-chemins (Multi-path based routing), et le routage basé sur la négociation (Negociation based routing).

2.3.2.1 Routage basé sur la Qualité de service (QoS)

Bien que la plupart des protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs peuvent être classés dans l'une des trois catégories précédemment décrites, certains d'entre eux adoptent des approches un peu plus différentes, telle que celles basées sur la qualité de service. Dans les protocoles de routage basés sur la qualité de service, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité des données. En particulier, le réseau doit satisfaire une certaine métrique de qualité de service, comme les délais de transmission, la largeur de la bande passante. . . [30] [78]. Nous discutons quelques exemples de ces protocoles dans cette section.

1) SPEED (A stateless protocol for realtime communication in sensor networks)

Dans [30], les auteurs ont proposé un protocole de routage pour les réseaux de capteurs avec qualité de service nommé SPEED. Pour assurer un acheminement des données en temps réel, avec des délais de bout en bout acceptables, le protocole maintient les informations de voisinage au niveau de chaque nœud, il utilise également la technique de renvoi géographique (geographic forwarding) pour la construction des routes employées. De plus, SPEED essaye de garantir une certaine vitesse de transmission pour chaque paquet dans le réseau. Ainsi, chaque application peut estimer, avant l'utilisation du protocole, les délais de bout en bout offerts, en divisant la distance qui sépare les capteurs sources des stations de base par la vitesse des paquets.

SPEED englobe également des techniques qui permettent d'éviter la congestion dans le réseau de capteurs.

Comparé au protocole DSR (Dynamic Source Routing) [41] et AODV (Ad hoc On-Demand distance Vector routing) [60], conçus pour les réseaux Ad hoc, SPEED a montré une meilleure efficacité en délai de transmission de bout en bout. De plus, la consommation d'énergie totale du protocole est plus faible grâce à la simplicité des opérations effectuées au moment du routage, ainsi qu'à la bonne distribution du trafic de données [30].

L'équilibrage de charge du trafic réseau est achevé dans SPEED via la technique adoptée par le module de routage appelé SNGF (Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding), qui consiste à disperser les paquets transmis sur un domaine de routage plus vaste [30]. Cette technique est similaire à celle utilisée par le protocole GBR [73] décrit précédemment pour la distribution uniforme du trafic à travers tout le réseau.

Enfin, il est à noter que le protocole SPEED ne considère aucune métrique pour l'optimisation en consommation d'énergie, par conséquent, et pour une meilleure compréhension de ses capacités d'optimisation de l'énergie consommée, ce protocole a besoin d'être comparé avec d'autres protocoles de routage, spécifiques aux réseaux de capteurs et efficaces en consommation d'énergie.

2) SAR (Sequential Assignment Routing)

Afin de sélectionner une route, le protocole SAR [78] prend en considération la consommation d'énergie et la qualité de service (QoS) sur chaque route candidate, ainsi que le niveau de priorité de chaque paquet transmis. Une approche multi-chemins est utilisée pour éviter les messages de contrôle qui peuvent résulter de la réestimation des routes quand celles employées deviennent défaillantes, dès lors, un schéma de restauration de chemins est utilisé. Pour créer des chemins multiples à partir de chaque nœud jusqu'au nœud puits, plusieurs arbres d'une longueur d'un saut de ce nœud sont initialement construits, chaque arbre est par la suite développé en allant successivement du nœud puits vers les autres nœuds, tout en évitant ceux qui ont les valeurs faible de QoS et d'énergie disponibles. A la fin du processus, chaque nœud fera partie des chemins multiples, et le capteur pourra savoir le nœud

voisin qui peut être utilisé pour transmettre le message.

Dans l'algorithme SAR, deux paramètres sont associés à chaque chemin pour chaque nœud, une métrique QoS additive, en plus d'une valeur qui mesure la ressource énergétique disponible dans chaque nœud. Cette dernière est calculée via l'estimation du nombre de paquets pouvant être routés suivant un chemin donnée, sans épuisement de l'énergie disponible chez le nœud. SAR calcule par la suite une métrique pondérée de QoS égale au produit de la métrique QoS additive par un coefficient lié au niveau de priorité du paquet transmit.

L'algorithme SAR essaye donc de minimiser la valeur moyenne de la métrique de QoS pondérée tout au long de la durée de vie du réseau. Un processus de calcul des chemins est relancé périodiquement par le nœud puits afin de prendre en compte tout changement dans la topologie du réseau. La prise en charge des chemins défaillants se fait entre les nœuds voisins en utilisant des procédures de recouvrement local.

2.3.2.2 Routage basé sur le flux de données dans le réseau

Dans cette approche, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux avec lequel les paquets sont produits par les différents nœuds [19] [84] [50].

2.3.2.3 Routage basé sur les multi-chemins

Dans le routage multi-chemins, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic. Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents [38] [19] [75] [3].

2.3.2.4 Routage basé sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles. Bien que, le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises et des prises de décisions adéquates suivant les ressources énergétiques disponibles des nœuds, l'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie et le scénario de négociation entre les nœuds produit un retard pour délivrer les données à la station de base [38] [78] [34].

2.3.3 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

2.3.3.1 Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Pour ce faire, les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes. Ainsi, les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données. Mais le problème qui se pose est la mise à jour de ces tables de routage. En effet, cette dernière est assurée par la diffusion périodique de paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux de grande taille [52] [91] [77].

2.3.3.2 Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (dits aussi, les protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée. Ainsi, ces protocoles offrent une meilleure conservation d'énergie par rapport aux protocoles proactifs. Néanmoins, le routage à la demande induit une lenteur à cause de la recherche des

chemins et une impossibilité de connaître au préalable la qualité du chemin (en terme de bande passante, délais, ...) [12] [75] [3] [77].

2.3.3.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes [16].

2.3.4 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être lancée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

2.3.4.1 Communication lancée par la source

Dans les protocoles de communication lancée par la source, les nœuds envoient des données à la destination une fois capturées. Ces protocoles utilisent les données rapportées avec time-driven ou avec event-driven. Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds capturent certains événements. Ainsi, l'absence des requêtes qui consomment beaucoup d'énergie générées par le nœud puits permet une efficacité énergétique et l'établissement de la communication dans le réseau évite le problème d'overhead. Néanmoins, dans ce type de protocoles les capteurs doivent avoir des informations sur les chemins qui conduisent au nœud puits et l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de la qualité de service doivent en général être respectées (latence, fiabilité) [19] [75] [3].

2.3.4.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancée par la destination utilisent les données rapportées avec query-driven, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région.

Dans ce type de protocoles, l'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits élimine les transmissions inutiles mais en contre partie, la circulation de messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs [12] [38] [54] [45].

2.4 Mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par des sources limitées d'énergie. De plus, dans certaines applications, ces nœuds ne peuvent pas être dotés de mécanismes de rechargement d'énergie, par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de la batterie associée. Sachant que les réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également. Le dysfonctionnement d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs.

La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseaux qui consomment le minimum d'énergie [44].

L'énergie totale consommée par un nœud capteur a pour origine trois fonctions principales : la capture, le traitement et la communication. Dans ce qui suit nous allons citer quelques mécanismes visant à minimiser l'énergie de capture, de traitement et de communication dans les réseaux de capteurs sans fil.

2.4.1 Energie de capture

La tâche de capture est effectuée par le composant de la capture qui traduit les phénomènes physiques en signal électrique. Ce dernier peut être digital ou analogique. Il existe plusieurs types de composants permettant la mesure des paramètres de l'environnement comme la température, le son, l'image, la pression, etc.

Les sources de consommation d'énergie dans ces composants peuvent être : l'échantillonnage des signaux, la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le traitement des signaux et la conversion analogique numérique. La consommation d'énergie par ces composants est dépendante de leurs tâches, les capteurs de température ou de tremblement de terre sont moins consommateurs d'énergie par rapport à ceux d'imagerie ou de vidéo [63].

L'énergie consommée lors de la capture peut être réduite en utilisant des composants à faible consommation mais en réduisant ainsi leurs performances. Ou bien par la suppression de la capture inutile en réduisant les durées de capture.

2.4.2 Energie de traitement

Le traitement inclut le contrôle des composants de capture et l'exécution des protocoles de communication et des algorithmes de traitement de signaux sur les données collectées. Le traitement est effectué par les microprocesseurs. Le choix de ces derniers est en fonction du scénario de l'application, et en général un compromis est fait entre le niveau de performance et la consommation d'énergie [63].

Il existe deux approches pour la minimisation énergétique lors du traitement des données par un nœud capteur :

- *L'approche partitionnement du système* : consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul.
- *L'approche DVS "Dynamic Voltage Scaling"* : consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances [95].

2.4.3 Energie de communication

L'énergie de communication représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud [61]. Cette communication est assurée dans la

plupart des RCSFs par le support de transmission radio. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par plusieurs facteurs : le type du système de modulation, la quantité des données à communiquer, la puissance de transmission (déterminée par la distance de transmission), etc. [39] [63].

En général, les radios peuvent fonctionner dans quatre modes d'opération différents : transmission (la radio transmet un paquet), réception (la radio reçoit un paquet), actif "idle" (la radio est sous tension, mais elle n'est pas employée) et sommeil (la radio est mise hors tension). La radio consomme beaucoup plus d'énergie dans les modes transmission et réception. Cependant, le mode actif est également coûteux en énergie. Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier nécessite que le module radio soit mis sous tension et décode continuellement les signaux radios pour détecter l'arrivée des paquets.

La minimisation de l'énergie pendant la communication est principalement liée aux protocoles développés pour la couche MAC [25] et la couche réseau. Le but des protocoles de cette dernière est de trouver les routes optimales en terme de consommation d'énergie. En effet, la perte d'énergie due à un mauvais acheminement des paquets de données a un impact sur la durée de vie du réseau et peut conduire au partitionnement de ce dernier (dissipation totale de l'énergie des capteurs sur certaines routes).

Dans ce qui suit, nous présentons les principales causes de la perte d'énergie lors de la phase de communication. Ces causes peuvent avoir un caractère local et global.

2.4.3.1 Causes de la réduction de la durée de vie lors de la communication

1) Au niveau local : MAC

Les principales sources de perte d'énergie sur le front local sont essentiellement celles causées par les imperfections des protocoles MAC à faire face aux problèmes suivants :

- *Écoute passive* : un nœud ne sachant pas quand lui sera adressée une trame doit maintenir sa radio dans le mode "prêt à recevoir" en permanence, comme le fait la méthode DCF (Distributed Coordination Function) du protocole de réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 [81]. Ce mode consomme beaucoup d'énergie, presque égale à celle consommée en mode réception [90]. Cette énergie est simplement gaspillée s'il n'y a aucune transmission sur le canal. Comme dans les réseaux de capteurs, le canal est libre la plupart du temps, l'écoute passive présente l'une des causes majeures de perte d'énergie.

- *Collisions* : elles concernent principalement les protocoles MAC à base de contention. Une collision peut se produire quand un nœud reçoit simultanément deux signaux ou plus en provenances de différents émetteurs qui transmettent en même temps de sorte qu'il n'est capable de décoder aucun signal. Quand une collision se produit, les énergies fournies pour la transmission et pour la réception des trames sont tout simplement perdues. Notons que bien qu'il y ait des protocoles MAC qui ne produisent pas de collisions, tels que TDMA (Time Division Multiple Access), les protocoles à base de contention sont plus utilisés dans des réseaux multi-sauts à cause de leur simplicité et de leur capacité à opérer dans un contexte décentralisé.

- *Écoute inutile* : elle est causée par la réception de trames ou signaux non pertinents. Les trames non pertinentes peuvent être des trames en unicast qui ne sont pas destinées au nœud en question, ou des trames en broadcast redondantes, ie. qui ont été déjà reçues dans le passé. Les signaux inutiles sont, par exemple, le long préambule transmis avant la trame de données dans les protocoles à échantillonnage de préambule.

- *surcoût du protocole* : il peut avoir plusieurs origines telles que les énergies perdues lors de la transmission et la réception des trames de contrôle. Par exemple, les trames de contrôle RTS/CTS (Request To Send/ Clear To Send) utilisées par certains protocoles ne véhiculent aucune informations alors que leur transmission consomme de l'énergie.

Notons que le trafic généré par les trames de contrôle dans un réseau de capteurs est loin d'être négligeable, il pourrait représenter jusqu'à 70% du trafic global [68].

2) Au niveau global : routage

Les principales raisons qui réduisent la durée de vie d'un réseau de capteurs, d'un point de vue global, sont dues aux imperfections suivantes des protocoles de routage :

- *Le choix des routes* : le protocole de routage doit choisir les routes qui consomment le minimum d'énergie par paquet acheminé tout en évitant l'utilisation excessive des nœuds critiques car la disparition prématurée de certains nœuds peut rendre inopérant l'ensemble du réseau, par exemple lorsque les puits se trouvent isolés. Ces deux critères sont antagonistes dans le cas général donc le défi est de trouver le meilleur compromis entre les deux.
- *Le surcoût* : les protocoles de routage échangent des messages de contrôle, tels que requête d'une route, réponse à une telle demande etc., pour établir des routes. Ces messages de routage présentent un coût supplémentaire. Donc le protocole de routage doit réduire autant que possible leur utilisation.

2.4.3.2 Les principales contributions aux niveaux MAC et routage

1) Au niveau MAC

Les réseaux de capteurs génèrent a priori un trafic très faible, et donc le canal de communication est libre la plupart du temps. Dans ces conditions, l'écoute passive est la source principale de gaspillage d'énergie. Pour diminuer l'écoute passive, les protocoles MAC efficace en énergie mettent les nœuds en sommeil pendant de longues périodes [47] [25]. Ces protocoles utilisent un taux d'activité qui est le rapport entre les durées des périodes d'activité et de sommeil.

Les protocoles utilisant des taux d'activité très bas, par exemple de 1% permettent de réduire la perte d'énergie de façon substantielle. Par contre, comme ces protocoles introduisent des périodes de sommeil, le problème de la surdité apparaît. Elle en-

traîne la perte des trames envoyées aux nœuds lorsqu'ils sont en période de sommeil. Pour faire face à cela, deux méthodes sont principalement utilisées : l'utilisation de périodes de sommeil/activité communes et l'échantillonnage de préambule [10].

- *Protocoles avec des périodes simultanées de sommeil/activité* : dans ce genre de protocoles, les nœuds se mettent en mode sommeil pour économiser l'énergie, et retournent en mode actif pour communiquer et échanger des messages ; l'alternance entre ces deux modes est périodique. Les périodes d'activité ont une longueur fixe ; la longueur des périodes de sommeil dépend du taux d'activité utilisé.

Pour obvier au problème de la surdité, les périodes de sommeil/activité des nœuds sont concomitantes. Cette simultanété requiert la maintenance d'une synchronisation entre les nœuds. SMAC (Sensor MAC), est l'un des protocoles utilisant ce type de périodes partagées, pour maintenir la synchronisation entre les nœuds. SMAC divise la période d'activité en deux sous périodes : une pour échanger des messages de synchronisations, et l'autre pour échanger les messages de données. La transmission des messages au cours de ces deux sous-périodes est similaire à celle utilisée par la méthode DCF d'IEEE 802.11 ; les nœuds écoutent le canal avant d'y accéder et ne transmettent que lorsqu'il est libre [10].

- *Protocoles à échantillonnage de préambule* : pour éviter les inconvénients causés par l'utilisation de périodes de sommeil et d'activité simultanées, les protocoles à échantillonnage de préambule laissent chaque nœud choisir leur moment de réveil indépendamment des autres. Dans ce genre de protocoles, l'écoute passive est réduite au strict minimum ; quand un nœud se réveille, il écoute le canal uniquement pour vérifier s'il est libre. Pour éviter la surdité, le nœud qui transmet doit précéder sa trame de données par un préambule suffisamment long pour s'assurer que tous les récepteurs potentiels le détectent.

Dans les protocoles à échantillonnage de préambule, en fonction du taux d'activité choisi, les nœuds se réveillent périodiquement tous les CI (Check Interval). Quand un nœud se réveille et trouve le canal libre, il retourne en veille im-

médiatement. Par contre, si le canal est occupé par un préambule, il reste à l'écoute pour recevoir la donnée transmise à sa suite. Le préambule doit être transmis pendant une durée qui est supérieure à CI pour assurer que tous les nœuds se réveillent au moins une fois pendant sa transmission et par conséquent reçoivent la donnée [10].

2) Au niveau routage

Pour allonger la durée de vie d'un réseau de capteurs, les protocoles de routage doivent être conçus de manière à présenter de bonnes performances sur le plan du choix des routes ainsi que sur celui de leur coût de fonctionnement, en particulier en émettant le moins de paquets possibles. L'optimisation du choix des routes se fait par l'utilisation de métriques prenant compte explicitement de l'énergie résiduelle des nœuds, alors que la réduction du coût de fonctionnement du protocole se fait par la minimisation et de la complexité de calcul et du nombre de messages échangés. Les principaux travaux menés dans ce contexte sont les suivants.

a) Réduction de la surcharge des protocoles de routage : en plus de la complexité de calcul, le surcoût des protocoles concerne aussi le nombre de messages échangés. Dans la littérature [4] [7] [42], les principales techniques utilisées pour la réduction du nombre de messages échangés sont l'agrégation et la retransmission sélective.

Ces deux techniques ne s'appliquent que si le contenu des messages est accessible aux nœuds intermédiaires donc ne peuvent pas être utilisées pour les messages cryptés de bout en bout. Dans ce qui suit, nous présentons quelques exemples de ces deux techniques.

- *Agrégation de messages* : suivant cette technique, un nœud intermédiaire peut agréger plusieurs messages similaires reçus pour n'en retransmettre qu'un seul. Cette technique exige que le contenu des messages soit "compris" par les nœuds intermédiaires. Pour la mettre en œuvre, le protocole directed diffusion (diffusion dirigée) [38] propose d'utiliser un schéma de nommage des données basées sur des attributs connus de tout les nœuds du réseau [10].

- *Retransmission sélective de messages* : cette technique est souvent utilisée pour réduire le nombre de messages envoyés alors qu'ils ne sont pas nécessaires pour le fonctionnement correct du protocole. Par exemple, l'utilisation de l'inondation aveugle pour envoyer un message à tous les nœuds d'un réseau génère des messages redondants. En effet, dans l'inondation aveugle chaque nœud qui reçoit un nouveau message le rediffuse localement à ses voisins. Comme chacun des voisins rediffuse lui aussi à ses voisins, chaque nœud recevra plusieurs copies du même message.

Pour réduire le nombre de messages redondants plusieurs méthodes de diffusion optimisée ont été élaborées. Elles se basent sur l'estimation par chaque nœud de la redondance de sa retransmission et sur la précision de cette estimation. Parmi les diffusions optimisées, il y a celles qui sont basées sur des heuristiques et qui donc n'assurent pas que le message atteint tous les nœuds du réseau, et les autres basées sur des solutions exactes et qui assurent donc une couverture totale du réseau. Notons que l'implémentation des solutions heuristiques est beaucoup plus simple que les autres [10].

Parmi les diffusions heuristiques, il y a la diffusion probabiliste [28] [57], la diffusion à base de compteur [57], de distance [57], etc.

Il existe également plusieurs diffusions exactes [17], parmi celles-ci, il y a la diffusion basée sur la localisation géographique [80].

b) Utilisation de métriques explicites basées sur l'énergie : pour allonger la durée de vie d'un réseau de capteurs, les protocoles de routage utilisent des métriques tenant compte de la consommation en énergie. En générale, les protocoles utilisent l'une, ou une combinaison, des deux métriques suivantes : "min" et "max-min".

La métrique min vise à minimiser l'énergie consommée pour l'acheminement d'un paquet de bout en bout.

La métrique max-min vise à équilibrer les charges entre les nœuds pour éviter une sur-utilisation qui mène à la disparition prématurée de nœuds situés sur des chemins plus utilisés.

- *Métrique min* : cette métrique choisit la route qui consomme le minimum d'énergie. Le choix de cette route peut se faire par n'importe quel algorithme du plus court chemin dans un graphe, le poids d'une arête étant la consommation d'énergie pour une transmission sur le lien correspondant.

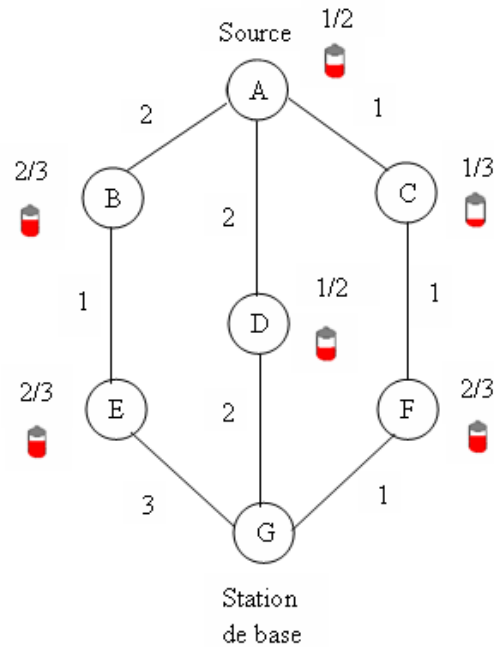


FIG. 2.3 – Exemple d'un réseau avec des métriques d'énergie

Par exemple, sur le réseau montré dans la figure 2.3, la route choisie est celle qui présente le coût minimum, ie. A-C-F-G dont le coût est égale à $1+1+1=3$. Notons que les coûts des liens dépendent de plusieurs paramètres tels que les puissances de transmission utilisées et les taux d'erreurs de transmissions sur chaque lien. Dans le cas de liens équivalents, la métrique min choisit la route qui a le minimum de bonds. Le principal inconvénient de la métrique min est qu'elle ne considère pas le taux d'utilisation des nœuds. Ainsi, des nœuds appartenant à une route fréquemment choisie par la métrique min peuvent disparaître prématurément, rendant le réseau inexploitable [10].

- *Métrique max-min* : cette métrique suppose que chaque nœud est capable de mesurer son énergie résiduelle. L'algorithme commence d'abord par chercher le nœud le plus déchargé, celui qui a l'énergie résiduelle la plus faible, sur chacune des routes. Par exemple sur le réseau de la figure présenté précédemment,

les nœuds les plus faibles pour les routes A-B-E-G, A-D-G et A-C-F-G sont B, D et C respectivement. Les énergies résiduelles des nœuds les plus faibles représentent les coûts des routes auxquels ils appartiennent. Ainsi, les coûts des routes A-B-E-G, A-D-G et A-C-F-G sont $2/3$, $1/2$ et $1/3$, respectivement. Ensuite, la route choisie est celle qui présente la plus grande qualité, ie. dont le nœud le plus faible est le plus chargé ; ce qui correspond à la route A-B-E-G. L'inconvénient principal de la métrique max-min est que les routes choisies ne sont pas forcément celles consommant le minimum d'énergie. Par conséquent, les routes choisies ne sont pas globalement optimales, ce qui peut finalement réduire la durée de vie du réseau [10].

En plus des techniques, citées ci-dessus, spécifiques à la conservation de l'énergie de capture, de traitement et de communication respectivement, une nouvelle technique dite d'équilibrage de charge, qui a fait ses preuves dans plusieurs domaines, a récemment été appliquée aux réseaux de capteurs. Le but étant de réduire la consommation d'énergie et ainsi augmenter la durée de vie du réseau de capteurs à travers une répartition équitable de la charge de travail entre les nœuds du réseau de capteurs. Les techniques d'équilibrage de charge peuvent donc intervenir à trois niveaux : capture, traitement et communication. Les résultats de simulation obtenus ont montré que ces techniques permettent une réduction considérable de l'énergie consommée dans un RCSF.

2.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner les différentes approches de routage et les mécanismes de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs. Parmi ces mécanismes, nous citons l'équilibrage de charge qui est une technique appliquée au réseaux de capteurs et qui permet une répartition équitable de la charge de travail à travers tous le réseau de capteurs et qui permet d'augmenter la durée de vie du réseau.

Dans le chapitre suivant nous allons énumérer quelques protocoles de la famille de protocoles avec équilibrage de charge proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite, nous allons introduire le principe adopté pour proposer une nouvelle technique d'équilibrage de charge visant à équilibrer la charge de travail dans le réseau et ce à travers un bon regroupement des capteurs en clusters.

3

Equilibrage de charge dans les RCSFs

3.1 Introduction

Les nœuds capteurs sont de petits dispositifs avec de très faibles capacités de calcul, et souvent alimentés par pile. En fonction des applications, ces nœuds peuvent être enchâssés dans des matériaux de construction, épandus dans la nature par un avion, ou encore installés manuellement par un être humain ou un robot. Dans de telles situations, les nœuds sont difficilement accessibles, voire complètement inaccessibles. Par conséquent, il est très difficile, coûteux, voire impossible de changer ou recharger les piles. Plusieurs problèmes retardent le déploiement à grande échelle des réseaux de capteurs. Un des problèmes centraux est la maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs. En effet, ces derniers doivent être rentables, et pour cela leur durée de bon fonctionnement doit être maximale.

La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs doit se faire sur deux fronts : local et global. Ces deux niveaux sont complémentaires ; au niveau local, chaque nœud optimise sa consommation d'énergie pour allonger sa durée de vie ;

alors que globalement, les nœuds coopèrent pour optimiser la gestion globale des ressources en énergie. Cette coopération a donné naissance à une nouvelle technique dite d'équilibrage de charge qui permet, à travers une répartition équitable de la charge de travail (capture, traitement et communication) entre les nœuds d'un RCSFs, de réduire la consommation d'énergie et ainsi augmenter la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, après la définition de la notion d'équilibrage de charge, nous énumérons quelques protocoles avec équilibrage de charge développés pour les réseaux de capteurs sans fil.

3.2 Principe de l'équilibrage de charge

Le but de toute technique d'équilibrage de charge (load balancing) est la distribution équitable de la charge de travail parmi les ressources disponibles d'un système.

L'équilibrage de charge a fait ses preuves dans plusieurs domaines notamment les serveurs web où cette technique est employée pour répartir équitablement la charge de travail sur plusieurs serveurs qui délivrent le même service et font le même travail : un système de serveurs web distribué [76].

Un autre domaine dans lequel la technique d'équilibrage de charge a également fait ses preuves est le domaine des systèmes parallèles ou répartis. Un système parallèle est un ensemble de processeurs reliés par un réseau de communication. Les processeurs communiquent par échange de messages. Un système parallèle est un système réparti fortement couplé utilisant un ensemble de processeurs homogènes reliés entre eux par des liens à haut débit. Le réseau d'interconnexion est statique (arbre, grille, hypercube) ou reconfigurable. Le coût de communications entre ces processeurs n'est pas uniforme car il dépend souvent du chemin à parcourir entre l'émetteur et le récepteur. L'exécution de programmes parallèles et/ou répartis sur une architecture matérielle répartie est un problème difficile. Le placement de programmes parallèles est fortement lié aux langages parallèles, aux compilateurs et aux machines spéci-

fiques utilisés. Le placement de programmes répartis est quant à lui, rendu difficile par l'hétérogénéité des processeurs utilisés et donc par des problèmes de gestion des formats et de l'alignement des données. Il doit aussi prendre en compte les coûts des communications entre sites et le partage dynamique des machines entre plusieurs utilisateurs (ce qui n'est en général pas le cas des machines parallèles). Il est donc clair que la traduction d'un langage de haut niveau en binaire ne suffit plus à la création d'une application répartie ou parallèle. On doit alors prévoir avant l'exécution sur quels processeurs, sur combien de processeurs et suivant quelles stratégies, placer les processus et les ressources d'un programme. Comme les composants actifs de l'application communiquent par échanges de messages, il faut aussi réduire au maximum, les coûts de communications. Les solutions aux contraintes qui régissent le placement d'applications réparties et parallèles sont diverses et passent par plusieurs techniques, parmi elles, la technique d'équilibrage de charge.

Afin d'obtenir de meilleures performances dans un système parallèle, il est donc primordial d'équilibrer la charge de travail à travers toutes ses ressources. En d'autres termes il est recommandé d'éviter toute situation où certaines ressources sont surchargées alors que d'autres le sont légèrement ou sont complètement libres [65].

Les objectifs d'une politique d'équilibrage de charge peuvent être de trois types : (i) minimisation du temps moyen de réponse ; (ii) maximisation du taux d'occupation des ressources ; et, (iii) réduction des coûts de communication [29] [8].

3.3 Application des techniques d'équilibrage de charge aux RCSFs

Afin d'obtenir de meilleures performances dans un réseau de capteurs en terme d'énergie consommée, il est primordial d'équilibrer la charge de travail à travers tous ses nœuds capteurs. L'équilibrage de charge couvre l'ensemble des techniques permettant une distribution équitable de la charge de travail parmi tous les nœuds du réseau. L'objectif consiste essentiellement à optimiser la consommation de l'énergie et ce afin d'éviter une mort prématurée du réseau de capteurs.

Les travaux antérieurs concernant le routage dans les réseaux de capteurs aussi bien

que le routage avec QoS dans les réseaux ad hoc sans fil ont largement ignoré le problème de l'équilibrage de charge [48] [23] [54] [50]. Ce dernier à été introduit récemment aux RCSFs et de nouveaux protocoles de routage ont ainsi pu voir le jour :

3.3.1 Protocole avec réception en $O(1)$

La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs requiert de progresser à deux échelles complémentaires : locale et globale. Localement, chaque nœud doit optimiser sa consommation d'énergie pour allonger sa durée de vie, alors que globalement, les nœuds doivent coopérer pour optimiser la gestion des ressources en énergie. C'est pour ces raisons que dans [10] les auteurs se sont attaqués aux deux problèmes par l'optimisation des protocoles de communication.

Deux raisons principales ont motivé ce choix. Premièrement, l'état de l'art montre clairement que les causes majeures de perte d'énergie sur le front local proviennent de l'inefficacité du protocole MAC à faire face à des problèmes tels que l'écoute passive, les collisions, l'écoute inutile, etc. Deuxièmement, l'optimisation globale passe par la coopération entre les nœuds, ce qui implique directement les protocoles de routage. Ainsi, la contribution a touché principalement les protocoles MAC et de routage :

- *A la couche MAC* : le travail réalisé concerne la réduction de deux principales sources de perte d'énergie : les collisions et l'écoute inutile.

En ce qui concerne les collisions, deux types de collisions sont distinguées : celles causées par des nœuds visibles et celles causées par des nœuds cachés. Ces deux types de collisions ont été modélisés et une solution qui permet de les réduire a été proposée.

Pour l'écoute inutile, les auteurs ont identifié deux types d'écoute inutile : celle causée par la réception de messages non pertinents, et celle causée par la réception de signaux non pertinents et proposent deux solutions pour ces deux types d'écoute inutile : les trames de résumé (Abstract Frames), et les préambules à base de micro-trames (MFP : Micro Frame Preamble). Les auteurs ont montré que l'utilisation des micro-trames permet d'éviter les deux types d'écoute inutile.

- *A la couche routage* : deux techniques ont été considérées, la réduction du surcoût des protocoles et l'équilibrage de charge entre les nœuds pour leur éviter un arrêt prématuré et ce en utilisant une métrique combinée explicite basée sur l'énergie.

Cette métrique réalise un compromis entre les deux métriques, *min* et *max-min* (voir 2.4.3.2), pour tirer profit de leurs avantages et réduire leurs inconvénients. Cette métrique définit un seuil, appelé seuil de protection de la batterie [84], pour éviter d'utiliser les nœuds dont l'énergie résiduelle est inférieure au seuil de protection de la batterie. L'algorithme est le suivant : tant qu'il y a des routes ne comprenant pas de nœud à protéger, choisir entre elles une route selon la métrique *min* ; quand toutes les routes contiennent des nœuds à protéger, choisir la route selon la métrique max-min. Cette métrique combinée commence par choisir les routes en fonction de la métrique min pour réduire la consommation globale d'énergie, et bascule vers la métrique max-min quand les nœuds s'affaiblissent pour éviter leur disparition prématurée. Le problème principal de la métrique combinée est qu'elle dépend de la valeur du seuil de protection utilisé qui est difficile à déterminer car il dépend de plusieurs paramètres tels que la topologie et la répartition du trafic entre les nœuds dans le réseau.

Les deux techniques (la réduction du surcoût des protocoles et l'équilibrage de charge entre les nœuds) ont été combinées ensemble dans un seul protocole appelé : protocole avec réception en $O(1)$.

Les protocoles MAC et de routage proposés dans [10] sont non seulement bénéfiques séparément mais ils présentent un degré important de synergie.

3.3.2 VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks)

Le protocole VCA proposé par Qin et Zimmermann [62] réalise une sélection de routeurs de grappes de manière distribuée : seule la connaissance des énergies résiduelles des capteurs du voisinage est nécessaire. Le principe du protocole est le suivant :

- *Calcul du score énergétique* : la fonction de poids utilisée pour la sélection d'un routeur de grappe est l'énergie résiduelle du capteur. Chaque capteur i diffuse à son voisinage sa valeur d'énergie résiduelle e_i et calcule pour chaque voisin j une note proportionnelle à l'énergie résiduelle envoyé par ce dernier.

$$\text{note}_{i,j} = e_j / \sum_{k \in V_i} e_k$$

où V_i est l'ensemble des voisins du capteur i .

Par la suite, chaque capteur diffuse les notes calculées à ses voisins et détermine son score énergétique par la somme des notes attribuées par ses voisins.

- *Auto-désignation du routeur* : le principe de VCA consiste alors pour chaque capteur à comparer son score énergétique avec celui de ses voisins : si celui-ci est plus élevé, alors il s'auto-désigne comme capteur-routeur (tête de grappe). Ainsi, au sein d'une grappe, le capteur assurant le rôle de routeur est nécessairement celui disposant de la plus haute énergie résiduelle.
- *Choix du routeur* : à cet effet, VCA associe, durant la phase d'initialisation, à chaque capteur une valeur de *fitness*. Un capteur choisit le routeur présentant une valeur de fitness maximale.

Une première approche (équilibrage par charge de routeur) consiste à utiliser la fonction de fitness suivante :

$$\text{fitness}(i) = 1 / \text{Card}(V_i)$$

Un capteur non-attaché choisit donc de rejoindre la grappe dont la tête de grappe a un nombre de voisins plus faible.

Une autre approche (équilibrage par énergie résiduelle), vise à maximiser la durée de vie du réseau. En l'occurrence, il apparaît intéressant qu'un capteur non rattaché privilégie son rattachement au routeur disposant de la durée de vie avant défaut de tension la plus importante. La fonction de fitness suivante est alors proposée :

$$\text{fitness}(i) = e_i / \text{Card}(V_i)$$

Où $Card(V_i)$ représente le nombre de voisins du capteur i .

D'après les tests réalisés, le protocole VCA est efficace pour réduire le nombre de routeurs et augmenter l'autonomie d'un réseau de capteurs (temps avant défaillance du premier capteur et du dernier capteur par défaut d'énergie) par rapport à d'autres protocoles existants tels que HEED ou GCA (A Generic weight-based Clustering Algorithm) [62]. Ce dernier est un algorithme de regroupement générique (similaire au principe de fonctionnement de WCA décrit en 2.3.1.2) sélectionnant les routeurs par leurs poids (le but est de maximiser le poids qui est l'énergie résiduelle).

3.3.3 Algorithme de clusterisation et d'équilibrage de charge dans les RCSFs avec cluster-heads mobiles

Dans [53], les auteurs ont considéré le problème du positionnement des cluster-heads mobiles et l'équilibrage de la charge du trafic dans un réseau de capteurs mobiles constitué de deux types de nœuds capteurs : les nœuds capteurs statiques de base et les cluster-heads mobiles.

Dans ce type de réseau, les nœuds capteurs sont organisés en clusters et forment la couche inférieure du réseau. Dans la couche supérieure, les cluster-heads collectent les données capturées par les nœuds capteurs statiques.

Les auteurs ont constaté que la position des clusters heads peut affecter d'une façon significative la durée de vie du réseau de capteurs. C'est pour cette raison que dans [53] une nouvelle heuristique pour le positionnement des cluster-heads et pour l'équilibrage de charge du trafic a été présentée. En effet, avec le déplacement des cluster-heads vers de meilleures positions, la charge du trafic peut être équilibrée et la durée de vie du réseau peut ainsi être prolongée.

La travail réalisé a été simulé en utilisant l'outil NS-2 [15] et les résultats obtenus montrent que l'algorithme proposé permet d'augmenter la durée de vie du réseau de 35%, après uniquement trois rounds d'ajustement, comparé à la durée de vie optimale du réseau de capteurs initial (sans déplacement des cluster-heads).

3.3.4 Algorithme d'optimisation de la durée de vie dans un réseau de capteurs

L'objectif des travaux présentés dans [1] est de proposer une approche permettant d'assurer la plus grande longévité possible d'un réseau de capteurs en équilibrant les consommations énergétiques entre nœuds voisins de façon distribuée.

Plutôt que de définir un énième protocole de communication, les auteurs ont choisi de développer une approche au niveau de la couche applicative, chaque nœud étant en charge d'un certain nombre de tâches. Réduire la consommation énergétique d'un nœud reviendrait donc à réduire le nombre de tâches qu'il doit exécuter. Naturellement, cela n'est pas possible pour tous les nœuds, puisque cela affecterait fortement le fonctionnement du réseau.

L'approche proposée permet de faire en sorte que la charge de chaque nœud soit proportionnelle à son niveau d'énergie restant, avec un coefficient de proportionnalité identique pour tous les nœuds. Pour équilibrer ce coefficient à travers tout le réseau les auteurs se sont inspirés des techniques d'équilibrage de charge, en migrant des tâches entre nœuds voisins. Le résultat de l'approche est un algorithme complètement distribué, exécuté par chaque nœud et nécessitant uniquement des communications avec ses voisins immédiats. Le travail réalisé se distingue également par la prise en compte de l'hétérogénéité des nœuds et de leur mobilité.

3.3.5 Algorithme d'équilibrage de charge à nœud central pour les RCSFs

Dans [23] les auteurs présentent une solution complète qui forme un arbre initial de routage et rééquilibre cet arbre en utilisant la connaissance topologique plutôt que la sélection aléatoire et c'est la métrique Chebyshev qui est utilisée comme métrique d'équilibrage de charge. Cette dernière se définit comme suit :

$$\forall a, a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

$$\forall b, b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$$

et

$$a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_n$$

$$b_1 \geq b_2 \geq \dots \geq b_n$$

Par conséquent :

$$n \sum_{k=1}^n a_k b_k \geq (\sum_{k=1}^n a_k) \times (\sum_{k=1}^n b_k)$$

Soit W_{bi} le poids (la charge cumulée) de la i^{eme} branche de l'arbre de routage correspondant au réseau de capteurs et $W = \{W_{b1}, W_{b2}, \dots, W_{bn}\}$ est le vecteur de poids associé à l'arbre de routage.

Par exemple, dans une grille carrée, le nœud au centre de la grille aura quatre voisins, ainsi il y aura quatre poids.

Pour évaluer le degré de l'équilibrage des différents poids des branches W , les auteurs posent $a = b = W$. Dans ce cas, les inégalités deviendront comme suit :

$$n \sum_{k=1}^n W_{bk}^2 \geq (\sum_{k=1}^n W_{bk})^2$$

Ou

$$1 \geq ((\sum_{k=1}^n W_{bk})^2 / n \sum_{k=1}^n W_{bk}^2)$$

Avec une égalité si et seulement si $W_{b1} = W_{b2} = \dots = W_{bn}$, $\forall W_{bk}$ et $k \in [1, n]$. Ainsi le facteur d'équilibrage θ utilisé dans l'algorithme est défini comme suit :

$$\theta = ((\sum_{k=1}^n W_{bk})^2 / n \sum_{k=1}^n W_{bk}^2)$$

Comme les poids au niveau de chaque branche convergent vers la même valeur, c'est-à-dire la charge à travers les différentes branches de l'arbre de routage devient plus équilibrée, le facteur d'équilibrage augmente et converge vers 1. Quand les poids de toutes les branches sont égaux, le résultat de l'inégalité sera égale à 1, c'est-à-dire la valeur maximale.

3.4 Principe de l'algorithme d'équilibrage de charge proposé

A travers les protocoles avec équilibrage de charge présentés, on constate que des techniques d'équilibrage de charge peuvent être appliquées aux réseaux de capteurs. Bien que leur principe n'est pas le même que celui des techniques appliquées dans d'autres domaines, le but reste le même : une distribution équitable de la charge de travail à travers toutes les ressources d'un système.

Les techniques énumérées ci-dessus montrent que de telles techniques peuvent être appliquées à tous les niveaux à savoir :

- *La clusterisation* : le but est non seulement de réaliser un regroupement équitable des capteurs en clusters mais aussi un regroupement consommant un minimum d'énergie (Protocole VCA).
- *Le traitement des données* : par le biais d'une migration des tâches entre nœuds voisins. Visant ainsi à réduire la consommation énergétique d'un nœud qui dépend du nombre de tâches qu'il doit exécuter (Algorithme d'optimisation de la durée de vie dans un réseau de capteurs).
- *Le routage* : minimisant ainsi l'énergie consommée lors de la phase de transmission de données (Protocole avec réception en $O(1)$).

Ce qu'on peut constater dans la plupart des protocoles conçus pour les réseaux de capteurs sans fil est qu'ils ne prennent en considération que l'énergie résiduelle des capteurs ce qui n'est en pratique pas suffisant notamment dans les protocoles hiérarchiques nécessitant un regroupement des capteurs en clusters et où chaque cluster est dominé par un seul capteur (cluster-head) ayant pour charge la gestion de tous les capteurs qui appartiennent à son cluster. De ce fait, l'énergie résiduelle n'est pas la seule ressource critique.

En effet, un capteur élu routeur aura pour fonction de traiter les données capturées par tous les capteurs du cluster (agrégation, fusion, ...), de transmettre ces données à la station de base; et parfois il décide, à travers une répartition de la charge de capture entre les capteurs du cluster, de la politique à adopter et transmet les décisions aux capteurs. Ce sont donc des tâches qui nécessitent d'autres critères à prendre en considération autre que l'énergie résiduelle des capteurs.

C'est pour ces raisons que nous proposons une approche permettant une meilleure clusterisation des capteurs où l'élection des cluster-heads est faite en fonction de

leur énergie, capacité mémorielle et calculatoire (équilibrage par charge des cluster-heads) et où les clusters se forment en fonction de la charge des cluster-heads et du nombre de capteurs à gérer (équilibrage par taille des clusters).

3.5 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur l'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs. En effet, après une définition de la notion d'équilibrage de charge une présentation de quelques protocoles appliquant des techniques d'équilibrage de charge a été réalisée.

Après l'étude des différents protocoles conçus pour les réseaux de capteurs sans fil, nous avons introduit le principe de la technique d'équilibrage de charge proposée. Cette dernière sera détaillée dans le chapitre suivant. Ce dernier sera donc consacré dans un premier temps à la présentation des différentes étapes de l'algorithme de regroupement avec équilibrage de charge proposé et dans un second temps à la discussion des différents résultats de simulation obtenus.

4

Algorithme de regroupement avec équilibrage de charge pour les RCSFs (CLB)

4.1 Introduction

Les algorithmes de regroupement (clustering) pour un réseau de capteurs permettent la constitution de grappes (clusters) de capteurs, chacun étant dominé par un routeur élu. Le regroupement autour d'un routeur s'impose naturellement afin de limiter la consommation d'énergie des capteurs : les capteurs affiliés au routeur transmettent leurs informations et celles-ci sont relayées par le routeur vers l'extérieur. Le nombre de messages envoyés (par fusion et compression des informations des capteurs) ainsi que les portées de transmission sont ainsi réduits.

Afin de proposer une approche permettant d'assurer la plus grande longévité possible, tout en optimisant d'autres ressources (mémoires et processeurs) dans un réseau de capteurs sans fil, notre intérêt s'est porté sur la combinaison d'un algo-

gorithme de clusterisation (regroupement) et d'une technique d'équilibrage de charge afin de pouvoir tirer profit des avantages des deux parties. En effet, afin d'obtenir de meilleures performances dans un réseau de capteurs, il est primordial d'équilibrer la charge de travail à travers toutes ses ressources. En d'autres termes, il est recommandé d'éviter toute situation où certains capteurs sont surchargés alors que d'autres le sont légèrement ou sont complètement libres. La majorité des travaux relatifs à l'équilibrage de charge se sont focalisés sur des réseaux dont les capteurs sont homogènes.

Dans ce qui suit, nous proposons un modèle d'équilibrage de charge pour les réseaux de capteur. Ce modèle possède les propriétés suivantes : il supporte l'hétérogénéité des capteurs et est totalement indépendant de toute topologie de réseau particulière.

Ce chapitre sera consacré, en premier lieu, à la présentation de l'algorithme de regroupement avec équilibrage de charge (A Clustering based Load Balancing Algorithm for Sensor Networks : CLB) proposé et ce à travers une description détaillée des différentes phases qui le constitue. L'algorithme proposé se base sur le principe du vote des capteurs utilisé par l'algorithme VCA (An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks) avec une prise en considération de critères de performances autre que l'énergie dans la phase de sélection des cluster-heads et en proposant un regroupement tenant en compte les caractéristiques des cluster-heads et le nombre de capteurs qu'ils doivent gérer (équilibrage de charge par taille des clusters et par charge des cluster-heads).

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous fournissons les résultats expérimentaux obtenus par CLB. Pour évaluer ses performances, nous avons choisi de les comparer par simulation avec celles de VCA puisque ce dernier fournit les performances que l'on peut espérer obtenir d'un protocole de clusterisation.

4.2 Motivations

L'équilibrage de charge est une technique fiable et puissante qui a fait ses preuves dans plusieurs domaines, en particulier dans le domaine des serveurs web distribués et des systèmes parallèles et distribués.

L'application d'une telle technique aux réseaux de capteurs permettra de conserver une quantité considérable d'énergie. Le fait que le domaine des serveurs web ou des autres domaines appliquant les techniques d'équilibrage de charge soit différent du domaine des réseaux de capteurs en particulier en terme de capacité des nœuds fait que les techniques d'équilibrage de charge appliquées soient différentes d'un domaine à un autre mais le but reste le même : répartir la charge de travail d'une manière équitable entre l'ensemble des éléments du système. C'est sur ce principe que tous les protocoles de routages dits à équilibrage de charge se sont reposés pour réduire considérablement la perte d'énergie.

C'est également sur ce principe que nous nous sommes reposés pour proposer une nouvelle technique d'équilibrage de charge permettant de réduire davantage la perte d'énergie dans les réseaux de capteurs tout en optimisant l'utilisation des mémoires et des processeurs entre capteurs voisins.

4.3 Clusterisation par équilibrage de charge

En général, la fonction de poids utilisée pour la sélection d'un cluster-head est l'énergie résiduelle du capteur. Dans la pratique, la considération de l'énergie résiduelle n'est pas suffisante pour le choix du routeur. En effet, certains capteurs-routeurs peuvent disposer d'énergies résiduelles importantes mais de ressources calculatoires ou mémorielles faibles : cela entraîne nécessairement une limitation de la taille de l'effectif gérable .

Un capteur non attaché ne se connectera pas à un routeur saturé en particulier lorsque le capteur est chargé de réaliser des tâches d'agrégation.

Pour ce faire, nous proposons de sélectionner les cluster-heads en fonction de leurs énergie résiduelle, capacité mémorielle et calculatoire. Cette sélection est faite de manière distribuée : seule la connaissance de la capacité énergétique, mémorielle et calculatoire des capteurs du voisinage est nécessaire.

Les différentes phases de l'algorithme de clusterisation proposé sont les suivantes :

4.3.1 Phase d'initialisation

La phase d'initialisation consiste à assigner à chaque capteur un poids d'éligibilité à devenir routeur en fonction de son énergie résiduelle e_i , sa capacité mémorielle m_i et sa capacité calculatoire c_i .

Chaque capteur 'i' diffuse à son voisinage un vecteur de données (e_i, m_i, c_i) : tous les capteurs à sa portée reçoivent ce vecteur.

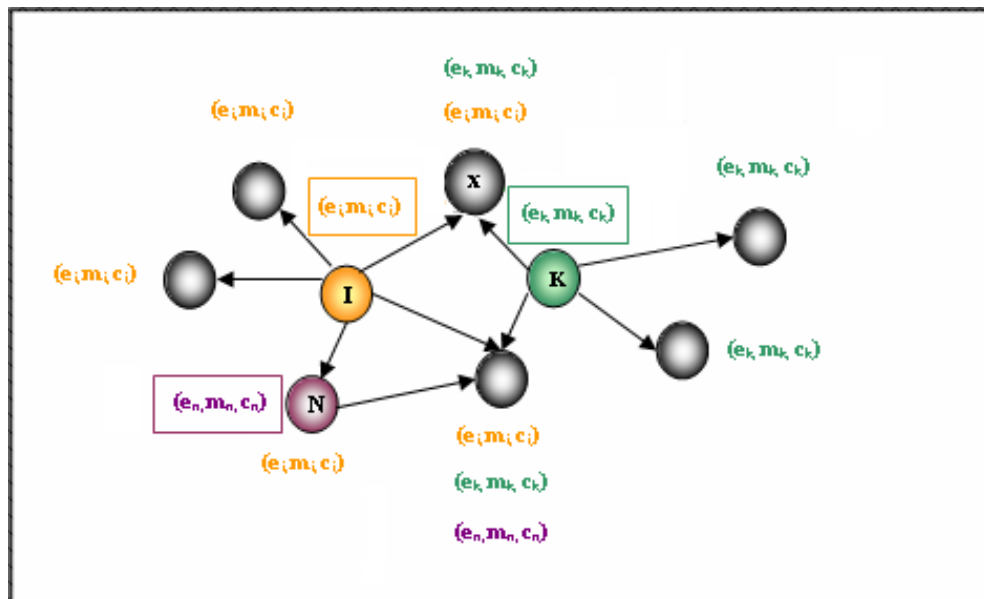


FIG. 4.1 – Emission du vecteur (e, m, c) par chaque capteur à tous ses voisins

Le capteur 'i' va collecter à son tour les vecteurs de données de l'ensemble de ses voisins V_i (V_i étant l'ensemble des capteurs dans la portée radio du capteur 'i') et leur attribue la note $N_{i,j}$ ('j' est le capteur pour lequel, le capteur 'i', va attribuer la note ' $N_{i,j}$ '), tel que :

$$N_{i,j} = e_j / \sum_{k \in V_i} e_k + m_j / \sum_{k \in V_i} m_k + c_j / \sum_{k \in V_i} c_k$$

Une fois les notes calculées, chaque capteur envoie les notes qu'il a attribuées aux capteurs de son voisinage : ceux-ci reçoivent ces notes ainsi que celles attribuées par les autres capteurs du réseau.

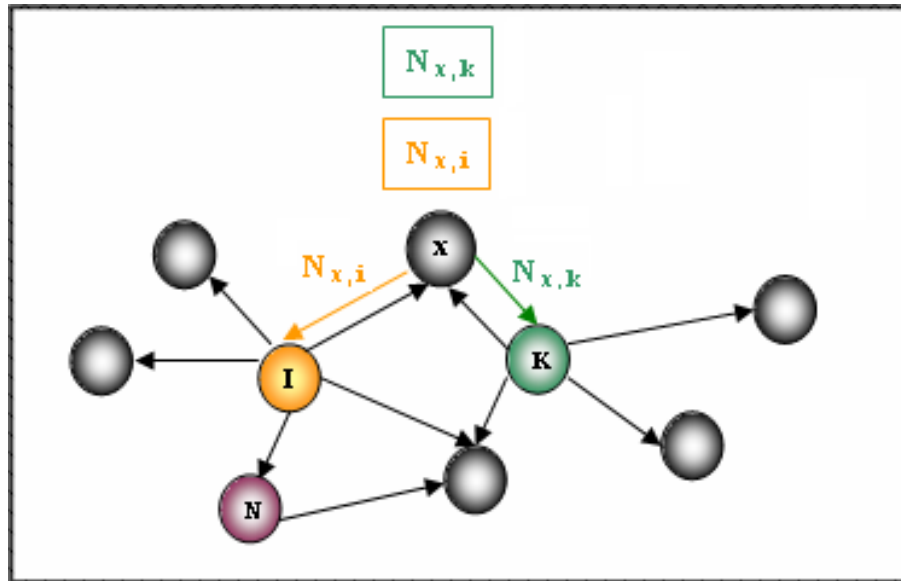


FIG. 4.2 – Envoi des notes déterminées

Après réception de toutes les notes attribuées à chaque capteur, tous les capteurs déterminent leur poids P_i , en fonction des notes, qui leur ont été attribuées comme suit :

$$P_i = \sum_{k \in V_i} N_{k,i}$$

Les poids d'éligibilité sont par la suite diffusés par chaque nœud à l'ensemble des nœuds de son voisinage.

4.3.2 Phase d'auto-désignation des cluster-heads

L'élection des cluster-heads est assurée par un processus itératif : dans un premier temps, l'ensemble des capteurs communiquent leur poids d'éligibilité à l'ensemble des capteurs de leur voisinage : chaque capteur constitue un vecteur \vec{W} de poids d'éligibilité.

A l'issue de cette itération initiale, chaque capteur connaît le poids d'éligibilité maximal : le capteur ayant ce poids sera élu cluster-head.

En effet, chaque capteur compare son poids d'éligibilité avec celui de ses voisins non encore élu cluster-head et non encore rattaché à un cluster-head : si son poids est plus élevé que celui de ses voisins, il s'auto-désigne cluster-head.

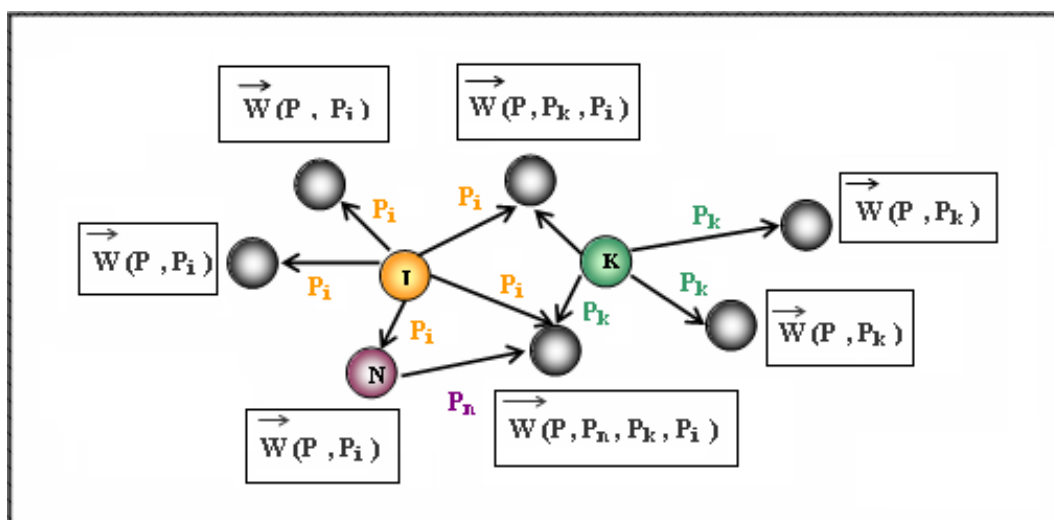


FIG. 4.3 – Constitution des vecteurs de poids d'éligibilité

4.3.3 Phase de rattachement aux cluster-heads

Après l'auto-désignation des cluster-heads, chaque cluster-head i calcule un facteur de charge CH_i qu'il diffuse à tous ses voisins tel que :

$$CH_i = P_i / \text{deg}_i$$

Où P_i représente le poids du cluster-head et deg_i représente le nombre de capteurs que contient le cluster dont le capteur i est cluster-head.

L'objectif fixé est la maximisation de la durée de vie du réseau de capteurs en équilibrant la charge des capteurs. Pour ce faire, un capteur non rattaché privilégiera son rattachement au cluster-head disposant de plus grandes ressources (énergétique, mémorielles et calculatoire) et ayant un minimum de charge (le nombre de capteurs à gérer).

Les capteurs non rattachés réceptionnent les annonces des cluster-heads nouvellement proclamés et réalisent leur choix en comparant toutes les valeurs de charge reçues. Une fois leur choix est réalisé, ils diffusent un message de retraitement de la procédure de clusterisation.

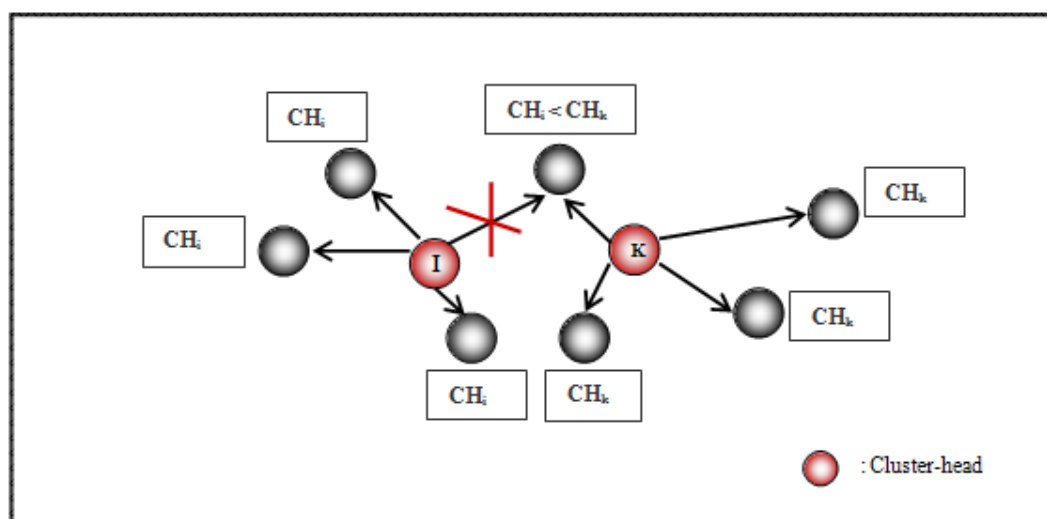


FIG. 4.4 – Envoi des facteurs de charge par les cluster-heads à leurs voisins

Au terme de cette dernière, certains capteurs se seront désignés cluster-heads et d'autres auront choisi de se rattacher à un cluster-head.

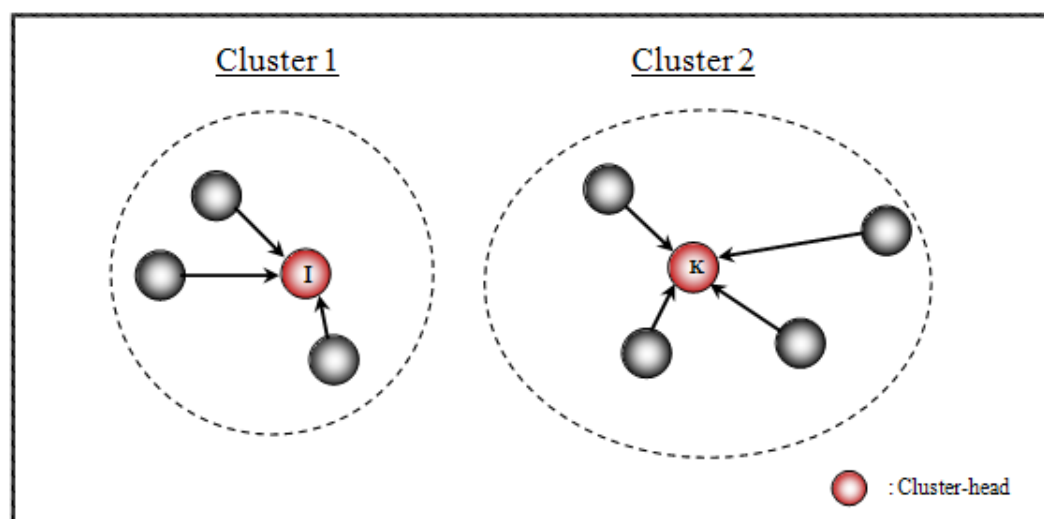


FIG. 4.5 – Rattachement des capteurs aux cluster-heads

4.3.4 Phase de mise à jour des poids d'éligibilité et des facteurs de charge

- Au début de chaque itération, il est nécessaire de réactualiser le poids d'éligibilité des capteurs non rattachés en ne considérant que les notes attribuées par les capteurs non rattachés. Un capteur peut avoir connaissance des capteurs

qui sont rattachés récemment en surveillant la présence de messages de retirement sur le medium. Il met à jour son poids en ignorant les notes des capteurs rattachés lors de l'itération précédente.

- A chaque rattachement d'un capteur à un cluster-head, ce dernier met à jour son facteur de charge en prenant en considération le nombre de capteurs nouvellement rattachés. Un cluster-head peut avoir connaissance des capteurs nouvellement rattachés à lui à travers les messages de rattachement émis par un capteur à son cluster-head une fois son choix effectué.

4.4 Simulation et analyse des performances

Une simulation consiste à gérer le temps ainsi que les actions qui sont liées aux différents instants d'un système réel et à faire fonctionner abstraitement le modèle qui représente ce système.

La simulation connaît de nos jours un essor considérable. Ceci est dû aussi bien à l'intérêt théorique que présente la modélisation des systèmes simulés, qu'au besoin croissant de simuler, par ordinateur, des réalisations de plus en plus complexes. Nous constatons, en effet, que les conditions d'expérimentation sont aujourd'hui toujours plus difficiles et plus coûteuses ; nous avons recours donc de plus en plus à l'expérimentation indirecte, notamment aux techniques de simulation. Celles-ci consistent à représenter la réalité simulée sur ordinateur, en mettant en évidence les progrès spectaculaires de l'infographie, à donner à celle-ci des moyens de perceptions réalisés artificiellement, puis à simuler son fonctionnement [27].

On distingue plusieurs modèles de simulation [27] selon qu'ils soient déterministes ou aléatoires, continus ou discrets.

Pour expérimenter la solution proposée, nous avons choisi d'utiliser notre propre outil de simulation. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs de RCSFs existants (NS-2, OMNet++, Glomosim, SENSE, TOSSIM, BOIDS et Shawn) [15], qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds et peu adaptés à nos besoins. Nous pouvons citer pour exemple NS-2, pour lequel beaucoup de modifications étaient

requis pour aboutir au résultat voulu. Le temps qui aurait été nécessaire pour réaliser ces modifications était bien supérieur à celui requis pour réaliser un simulateur minimal adapté à nos problèmes. De plus, de la part de la complexité de NS-2, il aurait été difficile de déterminer précisément si les modifications apportées ne corrompaient pas d'une manière ou d'une autre les résultats expérimentaux.

Afin d'avoir une partie expérimentale de la solution proposée et de valider les mécanismes déployés durant la phase de regroupement des capteurs dans un milieu hétérogène nous avons opté pour la simulation à événements discrets sur ordinateur.

4.4.1 Métriques de performances

Nous commençons tout d'abord, par préciser les métriques que nous avons jugées intéressantes à étudier :

- **Nombre de clusters** : mesure le nombre moyen de clusters formés durant une phase de regroupement (clusterisation).
- **Le nombre de clusters solitaires** : mesure le nombre moyen de clusters constitués d'un unique capteur-routeur.
- **Le nombre d'itérations** : mesure le nombre moyen d'itérations réalisées pour l'exécution de l'algorithme de regroupement.
- **L'énergie consommée** : mesure en moyenne la quantité d'énergie consommée par un capteur durant la phase de regroupement.
- **Distribution en énergie (De)** : mesure la distribution énergétique du cluster-head au sein du cluster qu'il dirige. Elle est définie par :

$$De = E_c / deg_c$$

Où E_c représente l'énergie résiduelle du cluster-head du cluster C et deg_c le nombre de capteurs du cluster C .

- **Distribution en mémoire (Dm)** : mesure la distribution mémorielle du cluster-head au sein du cluster qu'il dirige. Elle est définie par :

$$Dm = M_c / \text{deg}_c$$

Où M_c représente la capacité mémorielle du cluster-head du cluster C et deg_c représente le nombre de capteurs du cluster C .

- **Distribution de la cadence du processeur (Dc)** : mesure la distribution de la vitesse de traitement des opérations par le cluster-head au sein du cluster qu'il dirige. Elle est définie par :

$$Dc = C_c / \text{deg}_c$$

Où C_c représente la cadence du cluster-head du cluster C et deg_c représente le nombre de capteurs du cluster C .

4.4.2 Modèle de simulation

Le système considéré est basé sur l'approche événementielle. La simulation par événements discrets [27] désigne la modélisation d'un système réel tel qu'il évolue dans le temps, par une représentation dans laquelle les grandeurs caractérisant le système (variables) ne changent qu'en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps. Ces points sont les instants où se passent les événements.

Dans ce qui suit, nous détaillerons le modèle de simulation du système considéré.

4.4.2.1 Description du système

Notre système représente une zone de capture d'une surface de $(1000 \times 1000)m^2$ comportant 300 capteurs et une station de base. De ce fait, les entités de notre système, ainsi recensées, sont :

- **La station de base** : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.
- **Les Nœuds capteurs** : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs sans fil, immobiles,

aléatoirement dispersés sur le terrain simulé et présentant des caractéristiques différentes en mémoire et en puissance de traitement et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 5 joules.

Nous avons considéré à cet effet trois types de capteurs, en fonction de la taille de leur mémoire et de la cadence de leur processeur, représentés dans le tableau suivant :

	Type 1	Type 2	Type 3
Mémoire flash (Ko)	512	128	16
RAM (Ko)	64	4	1
Processeur (Mhz)	12	7	4

TAB. 4.1 – Types de capteurs sans fil

- **Les messages** : lors de la phase de regroupement les nœuds capteurs s'échangent 5 types de messages. Ces derniers sont représentés dans le tableau suivant :

Nom	Description
Vecteur de données	Message diffusé par chaque capteur à tous ses voisins. Ce message contient des informations sur les ressources du capteur émetteur.
Note	Message contenant la valeur calculée par chaque capteur à chacun de ses voisins directs en fonction des informations contenues dans les vecteurs de données reçus de ces voisins.
Poids d'éligibilité	Message diffusé par chaque capteur à tous ses voisins. Ce message contient une valeur calculée par chaque capteur en fonction des notes reçues par ce dernier.
Message d'auto-désignation	Message envoyé par chaque cluster-head, à tous ses voisins, les informant de son auto-désignation en tant que routeur. Ce message contient le facteur de charge du routeur (cluster-head) émetteur.
Message de rattachement	Message envoyé par chaque capteur, nouvellement rattaché à un cluster-head, à tous ses voisins les informant de son retraitement de la procédure de rattachement.

TAB. 4.2 – Types de messages

4.4.2.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio (voir figure 4.6) proposé par Heinzelman et al. [33] a été utilisé pour calculer l'énergie consommée en émission et en réception des messages. Selon ce modèle l'énergie consommée pendant la transmission (E_e) d'un message de pk bits est donnée par :

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

Alors que l'énergie consommée pendant la réception (E_r) d'un message de pk bits est donnée par :

$$E_r = E_{elec} \times pk$$

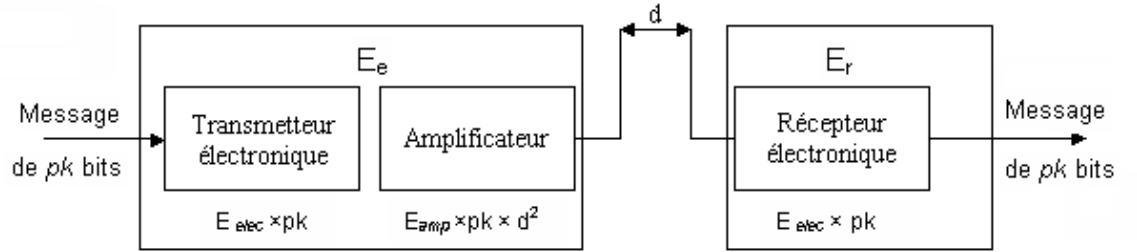


FIG. 4.6 – Modèle d'énergie

Où :

- E_e est l'énergie consommée en émission.
- E_r est l'énergie consommée en réception.
- E_{elec} est l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique) dont la valeur est fixée à 100 pJ/bit.
- E_{amp} est l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur) dont la valeur est fixée à 50 nJ/bit.
- pk est la taille en bit d'un paquet de données.
- d est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

4.4.2.3 Variables descriptives du système

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

Définition de la variable	Nom de la variable	Type	Unité de mesure
Energie consommée lors de l'émission d'un message	E_e	Réel	Joule
Energie consommée à la réception d'un message	E_r	Réel	Joule
Energie consommée lors du traitement d'un message	E_t	Réel	Joule
Energie résiduelle (ou courante) d'un capteur	E_c	Réel	Joule
Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D	(x,y)	(Réel,réel)	(Mètre,Mètre)
Distance entre deux capteurs	d	Réel	Mètre
Nombre de clusters	nbr_cluster	Entier	---
Nombre de capteurs par cluster	nbr_capteur	Entier	---
Nombre de clusters solitaires	nbr_cluster_sol	Entier	---
Nombre d'itérations	nbr_it	Entier	---

TAB. 4.3 – Variables descriptives du système

- **Energie résiduelle** : elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante et l'énergie consommée par un capteur. L'énergie d'un capteur est mise à jour par l'affectation suivante :

$$E_c = E_c - E_x \begin{cases} E_x = E_e & \text{si le capteur envoie un message;} \\ E_x = E_r + E_t & \text{si le capteur reçoit un message.} \end{cases}$$

- **Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D** : c'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille du terrain, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.

- **Distance entre deux capteurs** : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x , y) et un autre de coordonnées (x', y') :

$$d = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$$

4.4.2.4 Evènements discrets du système

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

Evènement	Description
Envoi des vecteurs de données	Cet évènement est l'évènement déclencheur de l'exécution de l'algorithme de regroupement.
Calcul des notes et leur envoi	Cet évènement se produit lorsqu'un capteur reçoit les vecteurs de données de ses voisins directs.
Calcul des poids d'éligibilité et leur envoi	Cet évènement se produit lorsqu'un capteur reçoit les notes attribuées par ses voisins.
Mise à jour du nombre de clusters	Cet évènement se produit à chaque auto-désignation d'un cluster-head.
Mise à jour des poids d'éligibilité	Cet évènement se produit à chaque nouvelle itération.
Mise à jour du nombre d'itérations	Cet évènement se produit à chaque nouvelle itération.
Mise à jour du nombre de capteurs par cluster	Cet évènement se produit à chaque rattachement d'un capteur à un cluster-head.
Mise à jour des facteurs de charge	Cet évènement se produit à chaque rattachement d'un capteur à un cluster-head.
Mise à jour du nombre de clusters solitaires	Cet évènement se produit à la fin de la procédure de regroupement et ce à chaque rencontre d'un cluster unitaire.

TAB. 4.4 – Evènements discrets du système

4.4.2.5 Choix du langage de programmation

Afin de valider expérimentalement l'algorithme de regroupement proposé nous avons choisi de concevoir notre propre simulateur en utilisant NetBeans 5.5.1.

NetBeans est un projet open source fondé par Sun Microsystems. L'IDE (Integrated Development Environment) NetBeans est un environnement de développement permettant d'écrire, compiler, déboguer et déployer des programmes. Il est écrit en Java mais peut supporter n'importe quel langage de programmation.

Il y a également un grand nombre de modules pour étendre l'IDE NetBeans. L'IDE NetBeans est un produit gratuit, sans aucune restriction quant à son usage. Java

s'annonce comme une des évolutions majeures de la programmation. Il satisfait aux besoins de l'immense majorité des développeurs. L'un des avantages évidents de ce langage est une bibliothèque d'exécution qui se veut indépendante de la plateforme : il est possible d'utiliser le même code pour Windows 95/98/NT, Solaris UNIX Macintosh,...

Les caractéristiques fondamentales de Java sont : Distribution, Fiabilité, Orienté objet, Architecture neutre, Portable, Interprété, Performances élevées et Multithread.

4.4.2.6 Etapes de réalisation du simulateur

Les étapes de réalisation de notre simulateur sont les suivantes :

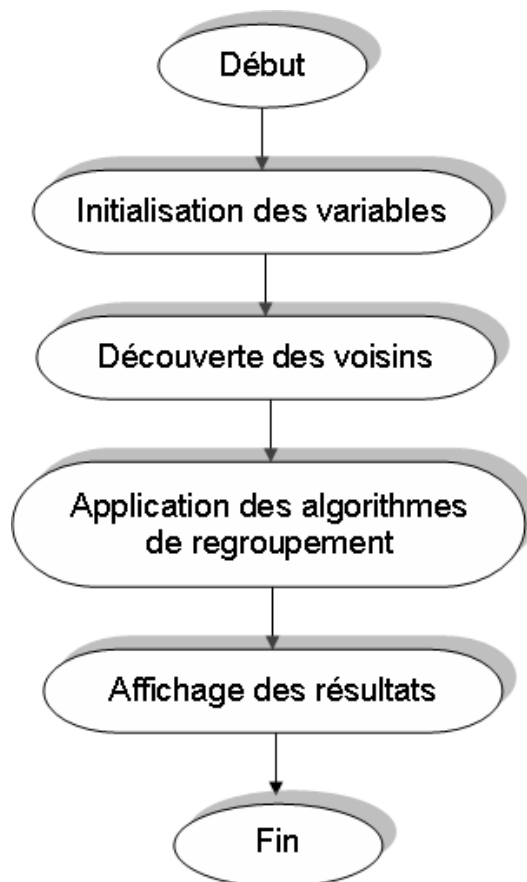


FIG. 4.7 – Etapes de réalisation du simulateur

- **Initialisation des variables** : cette étape correspond à la déclaration des variables globales (nombre de capteurs, surface du terrain simulé, nombre de tests et d'exécutions à réaliser ...), leur initialisation, la création des capteurs (portée

de transmission, capacité énergétique, capacité mémorielle, capacité calculatoire des capteurs) et leur déploiement aléatoire sur le terrain simulé.

- **Découverte des voisins** : la découverte des voisins est exécutée automatiquement au lancement de l'application. La découverte des voisins se fait par diffusion.

Chaque capteur se trouvant à une distance inférieure ou égale à la portée de transmission d'un autre capteur est sensé recevoir les messages diffusés par ce dernier et est, de ce fait, considéré comme son voisin.

- **Application des algorithmes de regroupement** : durant la phase précédente, une détermination des voisins de chaque capteur a été réalisée. A partir d'une connaissance du voisinage direct de chaque capteur (seule condition pour appliquer les algorithmes de regroupements) et des différents messages circulant dans le réseau (vecteur de données, note, ...), une décomposition du réseau en clusters sera réalisée par exécution des différentes étapes des deux algorithmes de clusterisation (VCA et CLB) implémentés.

- **Affichage des résultats** : les courbes obtenues (résultats de la phase précédente) serviront à comparer les protocoles de regroupement implémentés selon les critères d'évaluation de performances choisis (nombre de clusters, nombre de clusters solitaires, nombre d'itérations, énergie consommée, distribution des cluster-heads (en énergie, mémoire et cadence du processeur)).

4.4.3 Evaluation de performances

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus suivant les métriques discutées précédemment.

Pour chaque test, 50 exécutions indépendantes sont réalisées : les résultats présentés moyennent les résultats de toutes les exécutions.

Pour les simulations réalisées, le paramètre variable utilisé est la portée de chaque capteur : augmenter la portée d'un capteur est alors équivalent à augmenter la

densité du réseau ; il aurait donc été équivalent d'utiliser la surface du réseau pour variable.

4.4.3.1 Nombre de clusters

Nous nous intéressons au nombre de clusters générés par les algorithmes de regroupement étudiés. Nous recherchons la minimisation du nombre de clusters et en

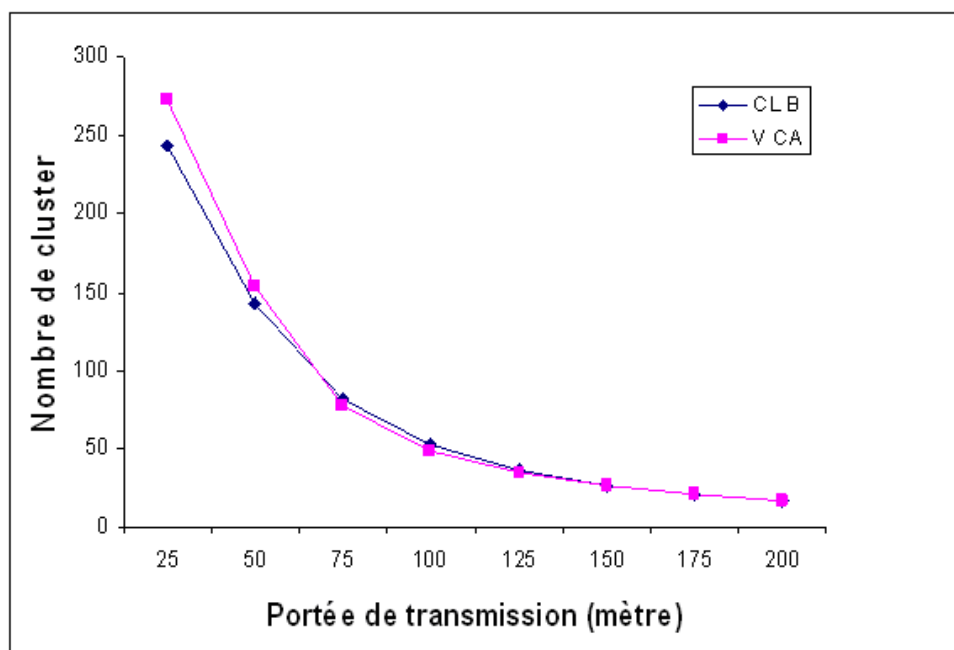


FIG. 4.8 – Variation du nombre de clusters formés en fonction de la portée des capteurs

particulier la minimisation du nombre de clusters constitués d'un unique capteur-routeur.

On constate que le nombre de clusters formés, comme le montre la figure 4.8, diminue avec l'augmentation de la portée des capteurs (densification du réseau). Ceci est en effet attendu en raison de la dispersion aléatoire des capteurs sur le terrain.

CLB permet de générer un nombre de clusters sensiblement inférieur à celui obtenu par l'utilisation de VCA, lorsque la portée de transmission des capteurs varie entre 25 et 75 mètres, où il atteint son maximum pour une portée de 25 mètres : VCA forme en moyenne 28,46 clusters en plus que CLB. L'augmentation de la portée au-delà de 75 mètres entraîne une formation d'un même nombre de clusters par

CLB et VCA.

Il est possible d'expliquer la limitation du nombre de clusters (donc de routeurs) par CLB par le favoritisme pour l'élection de routeur accordé aux capteurs disposant d'un important poids : en effet, le poids d'un capteur est calculé en fonction des notes attribuées par ses voisins, qui lors de leur calcul prennent en considération en plus de l'énergie résiduelle du capteur ses capacités mémorielles et calculatoires.

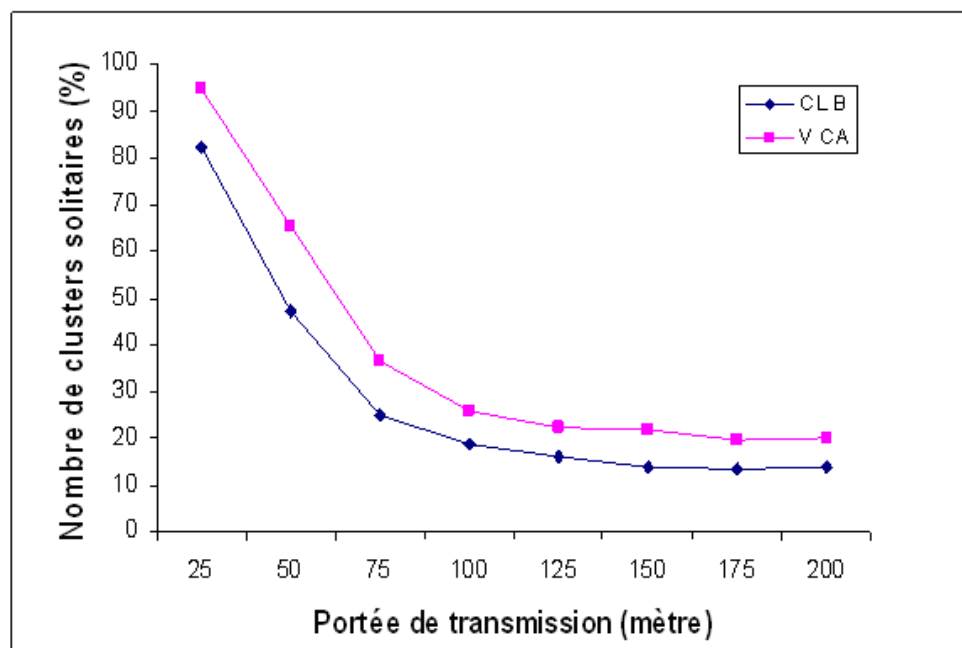


FIG. 4.9 – Variation du nombre de clusters solitaires en fonction de la portée des capteurs

Le pourcentage de clusters formés d'un unique capteur-routeur (figure 4.9) diminue avec l'augmentation de la portée des capteurs. Ceci est dû à la densification du réseau qui fait que le nombre de voisins de chaque capteur devient de plus en plus important et de ce fait le nombre de capteurs n'ayant aucun voisin diminue.

On remarque, sur la figure 4.9, que le pourcentage de clusters solitaires formés par CLB est nettement inférieur au pourcentage de clusters solitaires formés par VCA et ce quelque soit la portée de transmission des capteurs. L'écart entre le pourcentage de clusters solitaires formés par CLB et VCA atteint son maximum, qui est de 17,95%, pour une portée de 50 mètres en faveur de CLB. On remarque égale-

ment que le pourcentage de clusters solitaires formés par VCA est toujours élevé par rapport à ceux formés par CLB lorsque le nombre de clusters formés par les deux algorithmes est le même (figure 4.8) et varie entre 6,22% et 11,62% pour une portée de 200 mètres et 75 mètres respectivement.

L'utilisation de la fonction d'équilibrage de charge permet de limiter les clusters solitaires. En effet, un capteur non rattaché cherche alors à se rattacher au cluster, dont le facteur de charge du cluster-head est le plus élevé, dans sa portée de transmission.

4.4.3.2 Nombre d'itérations

L'étude du nombre d'itération de CLB permet d'étudier la complexité temporelle de cet algorithme de clusterisation.

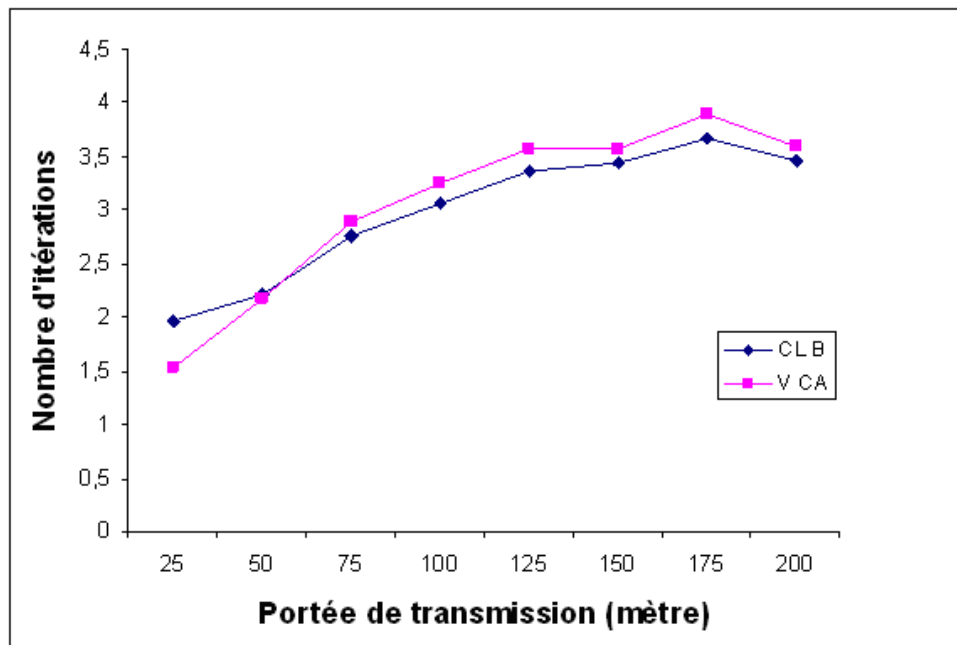


FIG. 4.10 – Variation du nombre d'itérations en fonction de la portée des capteurs

En pratique, avec un réseau de capteurs aléatoirement répartis, on constate sur la figure 4.10 que le nombre d'itérations nécessaires pour CLB est inférieur à 3,66 (inférieur à 3,9 avec VCA). Globalement, le nombre d'itérations augmente avec la densification mais reste raisonnable.

On remarque également, sur la même figure, que le nombre d'itérations nécessaires pour l'accomplissement d'une phase de clusterisation par VCA est inférieur à celui de CLB lorsque la portée est égale à 25 mètres et est égale lorsque la portée est égale à 50 mètres. Ceci est très raisonnable comparé au nombre réduit de clusters qu'a formé CLB par rapport à VCA avec les mêmes portées de transmission (figure 4.8).

On constate également, que même si à partir d'une portée de 75 mètres le nombre de clusters formés est presque le même par les deux algorithmes (figure 4.8), le nombre d'itérations nécessaires pour l'accomplissement d'une phase de clusterisation par CLB est inférieur au nombre d'itérations nécessaires pour l'accomplissement d'une phase de clusterisation par VCA.

4.4.3.3 Energie consommée

Vu les limitation en énergie des capteurs, il est primordiale de faire en sorte de réduire l'énergie consommée à tous les niveaux et ce afin de permettre une plus grande longévité au réseau.

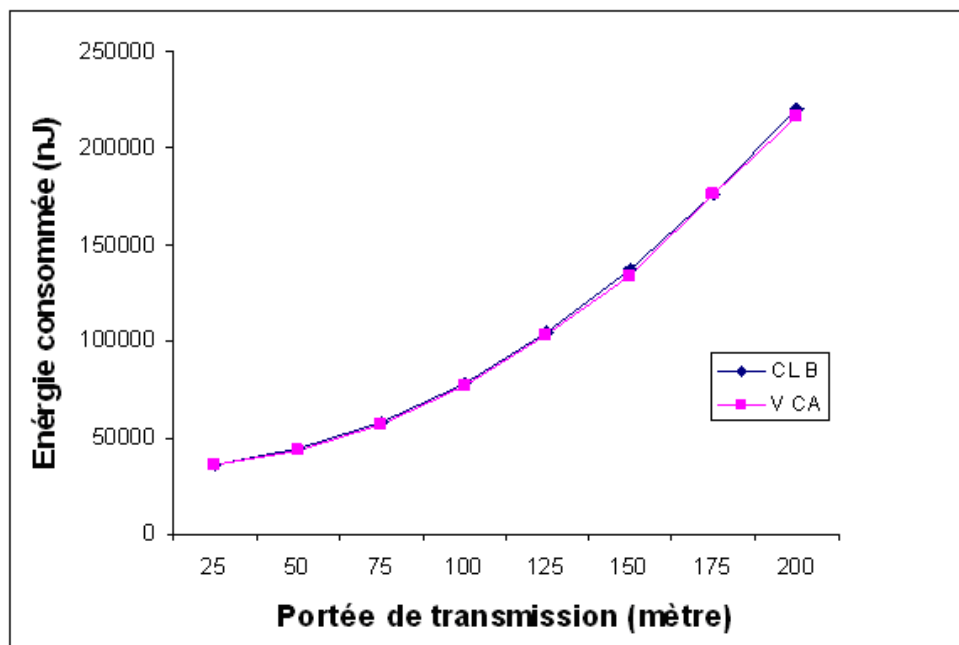


FIG. 4.11 – Variation de la quantité d'énergie consommée en fonction de la portée des capteurs

La figure 4.11 montre l'énergie consommée par un capteur durant la phase de clusterisation avec les deux algorithmes. On constate, qu'avec CLB et VCA, les capteurs consomment en moyenne la même quantité d'énergie et que l'énergie consommée augmente avec la densification du réseau. L'augmentation de la quantité de l'énergie consommée avec la densification est attendu car en augmentant la portée de transmission d'un capteur on augmente le nombre de capteurs dans son voisinage ce qui conduit à l'augmentation du nombre de messages échangés entre les capteurs (dont dépend l'énergie consommée en émission et en réception) et la distance séparant ces capteurs (dont dépend l'énergie consommée en émission).

4.4.3.4 Distribution des cluster-heads en énergie

Sachant que l'énergie consommée par un cluster-head dépend essentiellement du nombre de capteurs qu'il doit gérer (effectif du cluster), il est important d'équilibrer la taille des clusters en fonction de la charge des cluster-heads.

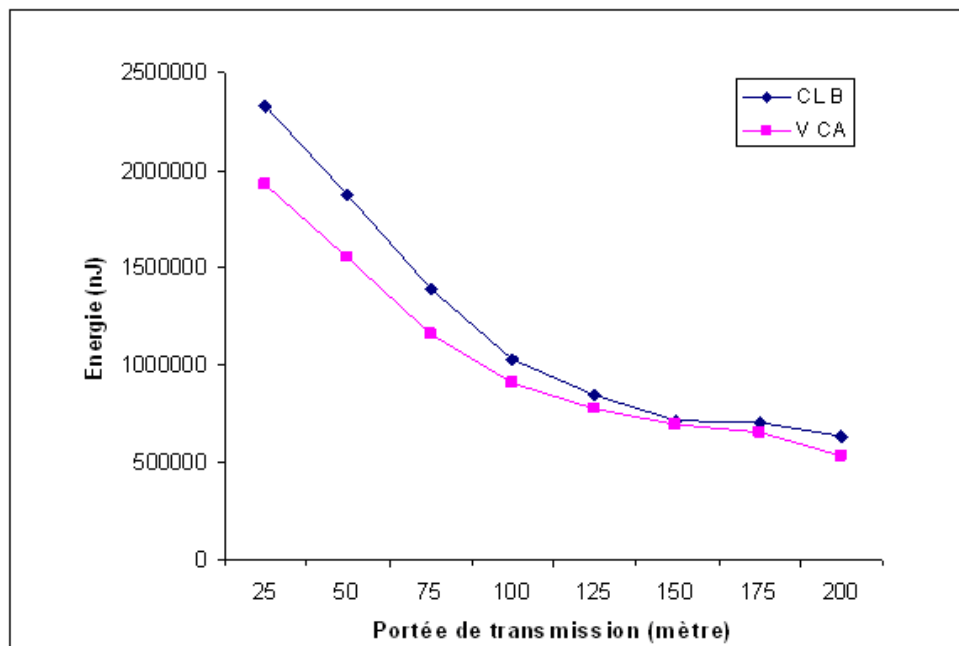


FIG. 4.12 – Distribution de l'énergie résiduelle des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs

En optant pour un tel principe, nous avons pu réduire le nombre de capteurs par cluster et ce en faisant en sorte qu'un capteur non rattaché privilégie son rattachement au cluster d'effectif le plus faible.

Ceci se traduit, comme le montre la figure ci-dessus, par l'augmentation considérable de l'énergie que peut consacrer chaque cluster-head pour la gestion d'un capteur au sein du cluster qu'il dirige avec l'algorithme CLB. Il est à noter, qu'à la fin de la phase de regroupement les capteurs y compris les cluster-heads ont en moyenne la même énergie résiduelle avec les deux algorithmes (comme le montre la figure 4.11).

La réduction de la quantité d'énergie (CLB et VCA) avec la densification est, quant à elle, attendue car en augmentant la portée de transmission d'un capteur on augmente le nombre de capteurs dans son voisinage et on augmente ainsi le nombre de capteurs par cluster.

4.4.3.5 Distribution des cluster-heads en capacité mémorielle et calculatoire

Les figures 4.13 et 4.14 montrent, respectivement, la distribution des cluster-heads en terme de capacités mémorielles et calculatoires.

On remarque, sur les figures 4.13 et 4.14, que la distribution des cluster-heads (avec CLB et VCA) en terme de capacités mémorielles et calculatoires diminue avec la densification. Ceci est dû, tout comme pour l'énergie, à l'augmentation de la portée de transmission des capteurs qui conduit à une augmentation du nombre de capteurs dans le voisinage de chaque capteur et ainsi à une augmentation du nombre de capteurs par cluster.

Les résultats obtenus avec CLB sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec VCA. Ceci s'explique par la non prise en compte de la capacité des capteurs en terme de taille de mémoire et de cadence du processeur lors de la phase du choix des cluster-heads.

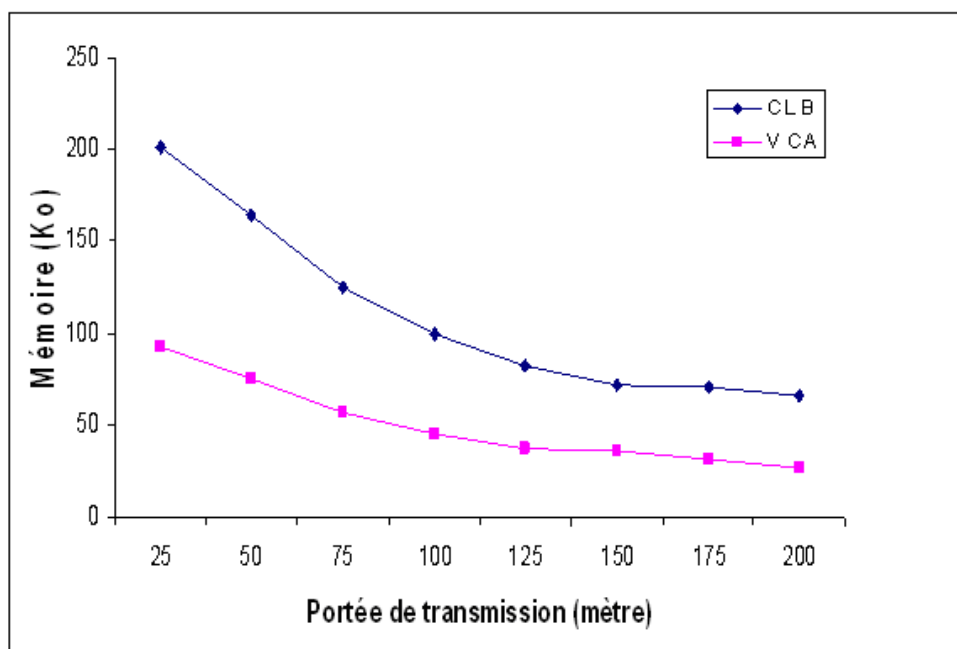


FIG. 4.13 – Distribution de la capacité mémorielle des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs

En effet, VCA ne considère que l'énergie résiduelle pour le choix d'un cluster-head ; ce qui n'est pas suffisant pour éviter la saturation de ce dernier en particulier parce que contrairement aux autres capteurs les cluster-heads seront chargés d'exécuter des tâches supplémentaires telle que l'agrégation de données par exemple.

Comme on peut le constater, la prise en compte de la taille de la mémoire et de la cadence du processeur des capteurs par CLB n'a en aucun cas été au détriment de l'énergie des cluster-heads (figure 4.12). Bien au contraire ça permettra de réduire l'énergie à consommer par les cluster-heads durant les phases de collecte des données et de communication et ce grâce à la réduction de l'effectif de capteurs à gérer par cluster-head.

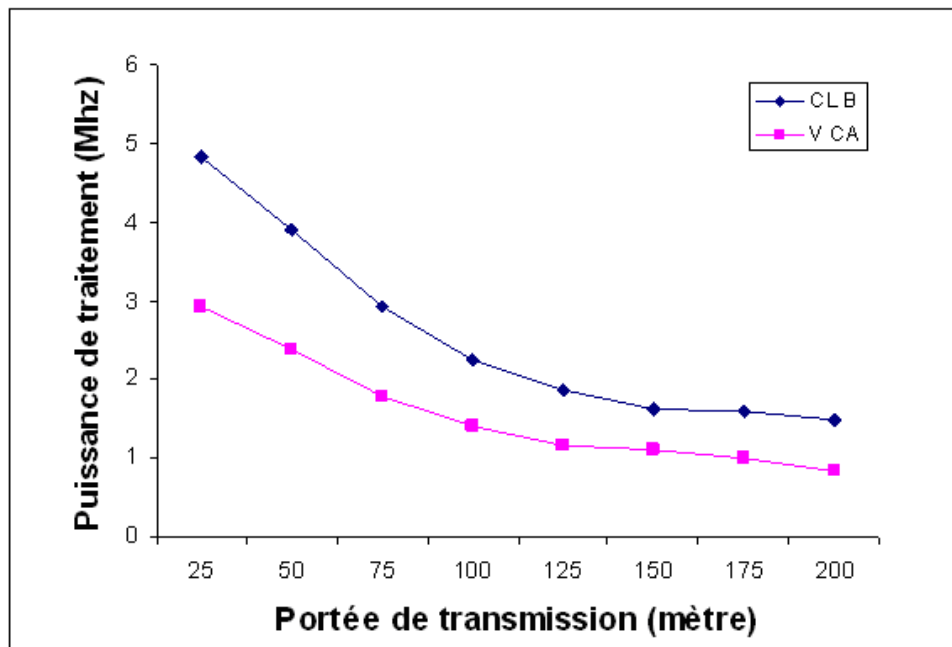


FIG. 4.14 – Distribution de la capacité calculatoire des cluster-heads en fonction de la portée des capteurs

4.5 Conclusion

Nous avons pu à travers ce chapitre mettre l'accent sur les principaux points constituant l'approche d'équilibrage de charge proposée. Le but de cette dernière étant d'assurer une plus grande longévité dans un réseau de capteurs sans fil tout en optimisant d'autres ressources (mémoires et processeurs).

Afin de valider l'approche proposée, des simulations à événements discrets sont réalisées et ce dans le but de montrer l'apport de l'approche proposée par rapport aux approches déjà existantes. D'après les tests réalisés, l'algorithme CLB est efficace pour réduire le nombre de clusters solitaires et permet à travers un équilibrage par charge de capteurs et par taille de clusters, de mieux économiser les ressources des capteurs en énergie, en mémoire et en traitement.

Conclusion générale & Perspectives

La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs requiert de progresser à deux échelles complémentaires : locale et globale. Localement, chaque nœud doit optimiser sa consommation d'énergie pour allonger sa durée de vie, alors que globalement, les nœuds doivent coopérer pour optimiser la gestion des ressources en énergie.

De plus, dans les protocoles de routage hiérarchiques proposés pour les réseaux de capteurs sans fil l'énergie n'est pas la seule ressource critique. En effet, dans un tel type de protocoles le réseau est organisé en clusters chacun étant dominé par un seul capteur (cluster-head). Ce dernier, doit gérer l'ensemble des capteurs du cluster. De ce fait, il sera en charge en fonction des applications de décider d'une politique visant à répartir la charge de capture entre les capteurs, recevoir les données capturées, les sauvegarder pour une certaine période de temps selon le besoin, les traiter et les communiquer à la station de base et parfois décider de l'action à entreprendre localement.

Dans ce mémoire, afin d'éviter la saturation des cluster-heads et leur mort prématurée, nous nous sommes attaqués aux deux problèmes par l'optimisation des protocoles de regroupement. Deux raisons principales ont motivé ce choix. Premièrement, l'état de l'art montre clairement que la plupart des protocoles hiérarchiques conçus pour les réseaux de capteurs ne prennent pas en considération les capacités mémoire et calculatoires des capteurs lors de la phase de sélection des cluster-heads. Deuxièmement, l'optimisation des ressources des cluster-heads passe par l'équilibrage du nombre de capteurs à gérer en fonction de la capacité des cluster-heads, ce qui implique directement les procédures de rattachement des capteurs aux cluster-heads.

Le résultat de l'approche proposée est un algorithme complètement distribué, exécuté par chaque nœud et nécessitant uniquement des communications avec ses voisins immédiats. Notre travail se distingue également par la prise en compte de l'hétérogénéité des nœuds.

L'approche proposée a été validée expérimentalement. D'une part, au vu des performances obtenues par simulation, en montrant la réduction considérable du nombre de clusters formés d'un unique capteur (cluster-head), d'autre part en montrant une meilleure distribution des ressources énergétiques, mémorielles et calculatoires des cluster-heads grâce à une meilleure sélection de ces derniers et grâce à la procédure de regroupement avec équilibrage de charge adoptée visant à équilibrer le nombre de capteurs par cluster en fonction de la charge des cluster-heads.

Comme perspective de notre travail, nous proposons un équilibrage de la charge de capture et de communication intra-cluster par le biais d'une segmentation de la vie du réseau en rounds caractérisés par un choix de cluster-head différent. Le quantum de temps attribué à chaque capteur sera proportionnel à la distance qui le sépare du cluster-head, à son énergie résiduelle, son débit moyen de transmission ainsi que l'énergie nécessaire à la transmission des données vers le cluster-head.

Une autre perspective consiste à appliquer récursivement l'algorithme CLB sur les capteurs, les routeurs, les routeurs des routeurs, . . .

Bibliographie

- [1] A. ABBAS. *Optimisation de la durée de vie dans un réseau de capteurs*. Thèse de doctorat en informatique, Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche-Comté, France, 2007.
- [2] M. ACHIR. *Technologies basse consommation pour les réseaux Ad hoc*. Thèse de doctorat en informatique, Institut National Polytechnique, Grenoble, France, Juillet 2005.
- [3] M. ACHIR and L. OUVRY. A routing protocol for wireless ad-hoc sensor networks : Multi-path source routing protocol (mpsr). In *ICN'05 : 4th International Conference on Networking (IEEE)*, Ile de la Réunion, France, Avril 2005.
- [4] K. AKKAYA and M. YOUNIS. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks Journal*, 3(3) :325–349, Mai 2005.
- [5] I-F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, and E. CAYIRCI. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8) :102–116, Août 2002.
- [6] I-F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, and E. CAYIRCI. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks (Elsevier) Journal*, 38(4) :393–422, Mars 2002.
- [7] J-N. AL-KARAKI and A-E. KAMAL. Routing techniques in wireless sensor networks : a survey. *IEEE Wireless Communications*, (6) :6–28, Décembre 2004.
- [8] M. ARORA, S-K. DAS, and R. BISWAS. A de-centralized scheduling and load balancing algorithm for heterogeneous grid environments. In *Workshop on Scheduling and Resource Management for Cluster Computing*, page 499–505, Vancouver, Canada, Août 2002.

-
- [9] D. NIELSON B. LEINER and F. TOBAGI. Packet radio networks. In *IEEE (Special Issue, Packet Radio Networks)*, volume 25, Janvier 1987.
- [10] A. BACHIR. *Allongement de la durée de vie des réseaux sans fil de capteurs par l'optimisation des protocoles de routage et d'accès au canal*. Thèse de doctorat en informatique, Institut National Polytechnique, Grenoble, France, Janvier 2007.
- [11] N. BADACHE. La mobilité dans les systèmes répartis. *Techniques et sciences informatique*, 17(8) :969–997, 1998.
- [12] C-D. BRAGINSKY and D. ESTRIN. Rumor routing algorithm for sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pages 22–31, New York, USA, 2002.
- [13] A. BUCZAK and V. JAMALABAD. Self-organization of a heterogeneous sensor network by genetic algorithms. *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, C.H. Dagli*, 8 :259–264, ASME Press, New York, 1998.
- [14] N. BULUSU, D. ESTRIN, L. GIROD, and J. HEIDEMANN. Scalable coordination for wireless sensor networks : selfconfiguring localization systems. *International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001)*, Ambleside, Royaume Uni, Juillet 2001.
- [15] G-A. DI CARO. Analysis of simulation environments for mobile ad hoc networks. Technical Report IDSIA-24-03, Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence, Switzerland, Décembre 2003.
- [16] J. CARTIGNY. *Contributions à la diffusion dans les réseaux ad hoc*. Thèse de doctorat en informatique, Université des Sciences et Technologies, Lille, France, Décembre 2003.
- [17] J. CARTIGNY, D. SIMPLOT, and I. STOJMENOVIC. Localized minimum-energy broadcasting in ad-hoc networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, San Francisco, USA, Avril 2003.
- [18] M. CARTRON. *Vers une plate-forme efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de doctorat en informatique, Université de RENNES 1, France, Décembre 2006.

-
- [19] J-H. CHANG and L.TASSIULAS. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings IEEE, INFOCOM 2000. 9th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 1, 2000.
- [20] M. CHATTERJEE, S. DAS, and D. TURGUT. Wca : A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks. *Journal of Cluster Computing, Special issue on Mobile Ad hoc Networking*, (5) :193–204, 2002.
- [21] I. CHLAMTAC, M. CONTI, and J. LIU. Mobile ad hoc networking : Imperatives and challenges. *Elsevier Ad Hoc Networks Journal*, 1(1) :13–64, Juillet 2003.
- [22] S. CORSON and J. MACKER. Mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations. *Request for Comments 2501, Internet Engineering Task Force*, Janvier 1999.
- [23] H. DAI and R. HAN. A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) - Wireless Communications*, 1(1-5) :548 – 552, 2003.
- [24] Equipe de Get 2005 Capt'Ad-hoc. Sensor networks : State of the art. Technical report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA, Mars 2006.
- [25] I. DEMIRKOL, C. ERSOY, and F. ALAGÖZ. Mac protocols for wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :115–121, Avril 2006.
- [26] O. DERHAB. *Le problème d'exclusion mutuelle dans les réseaux mobiles Ad Hoc*. Thèse de magistère, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, 2003.
- [27] P. ERARD and P. DEGUENON. Simulation par évènements discrets. *Presses polytechnique et universitaire Romandes*, 1996.
- [28] Z. HAAS, J. HALPERN, and L. LI. Gossip-based ad hoc routing. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, New York, USA, Juin 2002.
- [29] D-J. HARVEY. *Load Balancing Techniques for Distributed Processing Environments*. Thèse de doctorat, Université de Texas, USA, Août 2001.
- [30] T. HE, J-A. STANKOVIC, C. LU, and T. ABDELZAHER. Speed : A stateless protocol for realtime communication in sensor networks. In *Proceedings of*

-
- the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pages 46–55, Mai 2003.
- [31] S. HEDETNIEMI and A. LIESTMAN. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. *Networks (New York, NY)*, 18(4) :319–349, 1988.
- [32] W. HEINZELMAN. *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. Thèse de doctorat en informatique, Institut de technologie du Massachusetts, USA, 2000.
- [33] W-R. HEINZELMAN, A. CHANDRAKASAN, and H. BALAKRISHNAN. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 3005–3014, Janvier 2000.
- [34] W-R. HEINZELMAN, J. KULIK, and H. BALAKRISHNAN. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 174–185, Seattle, Washington, USA, Août 1999.
- [35] W-R. HEINZELMAN, J. KULIK, and H. BALAKRISHNAN. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 8(2-3) :169–185, 2002.
- [36] J. Hill and al. System architecture directions for networked sensors. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 34(5) :93–104, 2000.
- [37] G. HOBLOS, M. STAROSWIECKI, and A. AITOUICHE. Optimal design of fault tolerant sensor networks. In *IEEE International Conference on Control Applications*, page 467–472, Anchorage, Alaska, Septembre 2000.
- [38] C. INTANAGONWIWAT, R. GOVINDAN, and D. ESTRIN. Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 55–67, Boston, USA, Août 2000.
- [39] S. JAIN. Energy aware communication in ad-hoc networks. Technical report, UW-CSE, Juin 2003.

-
- [40] Q. JIANG and D. MANIVANNAN. Routing protocols for sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2004)*, Las Vegas, Nevada, USA, Janvier 2004.
- [41] D-B. JOHNSON, D-A. MALTZ, and J. BROCH. Dsr : The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad-hoc networks. *Ad Hoc Networking*, 1 :139–172, 2001.
- [42] H. KARL and A. WILLIG. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley edition, 2005.
- [43] B. KARP and H-T. KUNG. Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pages 243–254, Boston, USA, Août 2000.
- [44] L. KHELLADI and N. BADACHE. Les réseaux de capteurs : état de l’art. Rapport de recherche, Laboratoire des Systèmes Informatique, Université Bab Ezzouar, Alger, Février 2004.
- [45] H-S. KIM, T-F. ABDELZAHER, and W-H. KWON. Minimum energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. In *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, volume 7, pages 193–204, New York, USA, 2003.
- [46] B. KRISHNAMACHARI, D. ESTRIN, and S. WICKER. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2002.
- [47] K. LANGENDOEN and G. HALKES. *Energy-Efficient Medium Access Control*. Book chapter in the Embedded Systems Handbook, R. Zurawski (editor), CRC press, 2005.
- [48] S-S. LEE and M. GERLA. Fault tolerance and load balancing in qos provisioning with multiple mpls paths. *IWQoS*, pages 155–169, 2001.
- [49] L. LI and J-Y. HALPERN. Minimum-energy mobile wireless networks revisited. In *IEEE International Conference on Communications (ICC '01)*, Helsinki, Finland, 2001.

-
- [50] Q. LI, J. ASLAM, and D. RUS. Hierarchical power-aware routing in sensor networks. In *Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking*, Mai 2001.
- [51] C-R. LIN and M. GERLA. Adaptive clustering for mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 15(7) :1265–1275, Septembre 1997.
- [52] S. LINDSEY and C-S. RAGHAVENDRA. Pegasus : Power efficient gathering in sensor information systems. In *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, volume 3, 2002.
- [53] M. MA and Y. YANG. Clustering and load balancing in hybrid sensor networks with mobile cluster heads. In *Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks*, Canada, 2006.
- [54] A. MANJESHWAR and D-P. AGRAWAL. Teen : A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, 2001.
- [55] R. MERAIHI. *Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc*. Thèse de doctorat en informatique, TELECOM PARIS, L'école nationale supérieure des télécommunications, France, 2005.
- [56] N. MITTON. *Auto-organisation dans les réseaux sans fil multi-sauts à grande échelle*. Thèse de doctorat en informatique et réseaux, INSA de Lyon, INRIA Rhone Alpes, Lyon, France, Mars 2006.
- [57] S-Y. NI and al. The broadcast storm problem in mobile ad hoc network. In *Proceedings of the IEEE/ACM Mobicom*, 1999.
- [58] T. NIEBERG, S. DULMAN, P. HAVINGA, L-V. HOESEL, and J. WU. *Collaborative algorithms for communication in wireless sensor networks*. Ambient Intelligence : Impact on Embedded Systems, Kluwer Academic Publishers, Octobre 2003.
- [59] C-E. PERKINS. *Ad-hoc networking*. Addison-wesley boston edition, 2001.

-
- [60] C-E. PERKINS and E-M. ROYER. Ad hoc on-demand distance vector routing (aodv). In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, number 25-26, pages 90–100, 1999.
- [61] G-J. POTTIE and W-J. KAISER. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, Mai 2000.
- [62] M. QIN and R. ZIMMERMANN. Vca : An energy-efficient voting-based clustering algorithm for sensor networks. *Journal of Universal Computer Science*, 13(1) :87–109, Janvier 2007.
- [63] V. RAGHUNATHAN, C. SCHURGERS, S. PARK, and M-B. SRIVASTAVA. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2) :40–50, Mars 2002.
- [64] V. RAJAVAVIVARME, Y. YANG, and T. YANG. A overview of wireless sensor network and applications. In *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory*, pages 432–436, 2003.
- [65] P-G. RAVEDY. *Gestion des ressources et répartition de charge dans les systèmes hétérogènes à grande échelle : application aux environnements mobiles et parallèles*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, France, 1996.
- [66] S. REDAOUI. *Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc*. Thèse de magistère, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, 2003.
- [67] P. RENTALA, R. MUSUNNURI, S. GANDHAM, and U. SAXENA. *Survey on Sensor Networks*. University of Texas, Dallas.
- [68] I. RHEE and al. Z-mac : a hybrid mac for wireless sensor networks. In *Proceedings of ACM SenSys*, San Diego, USA, Novembre 2005.
- [69] V. RODOPLU and T-H. MENG. Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 17(8) :1333–1344, 1999.
- [70] E-M. ROYER and C-K. TOH. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, Avril 1999.
- [71] N. SADAGOPAN, B. KRISHNAMACHARI, and A. HELMY. The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks. In *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications*, pages 149–155, Anchorage, USA, Mai 2003.

-
- [72] A. SAVVIDES, C. HAN, and M. SRIVASTAVA. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. In *Proceedings of ACM MobiCom '01*, page 166–179, Rome, Italie, Juillet 2001.
- [73] C. SCHURGERS and M-B. SRIVASTAVA. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In *Military Communications Conference (MILCOM) on Communications for Network-Centric Operations : Creating the Information Force, IEEE*, volume 1, pages 357–361, McLean, USA, 2001.
- [74] M. SEDRATI, L. AOURAGH, L. GUETTALA, and A. BILAMI. Etude des performances des protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc. In *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007*, Novembre 2007.
- [75] R. SHAH and J-M. RABAEY. Energy aware routing for low energy ad-hoc sensor networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, volume 1, 2002.
- [76] F. SHEMCHEDINE. *QoS dans les Systèmes de serveurs Web Distribués*. Thèse de magistère en informatique, Université de Bejaia, 2006.
- [77] D. SIMPLOT-RYL. Some real-time issues in wireless sensor networks. Technical report, IRCICA/LIFL, Université Lille 1 CNRS UMR 8022, INRIA Futurs, Ecole d'été Temps Réel, 2005.
- [78] K. SOHRABI, J. GAO, V. AILAWADHI, and G-J. POTTIE. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5) :16–27, 2000.
- [79] L. SUBRAMANIAN and R-H. KATZ. An architecture for building self configurable systems. In *Proceedings of the IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing*, pages 63–73, 2000.
- [80] M. SUN, W. FENG, and T-H. LAI. Location aided broadcast in wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2001*, page 2842–2846, San Antonio, TX, Novembre 2001.
- [81] P. MUHLE THALER. *802.11 et les réseaux sans fil*. Eyrolles edition, Août 2002.

-
- [82] N. THEPVILOJANAPONG. *A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks*. Thèse de doctorat, Département d'Information et Ingénierie de Communication, Université de Tokyo, Japan, Décembre 2005.
- [83] S. TILAK, N. ABU-GHAZALEH, and W. HEINZELMAN. A taxonomy of wireless micro-sensors network models. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 1 :1–8, 2002.
- [84] C-K. TOH. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 39(6) :138–147, Juin 2001.
- [85] A. WANG and A. CHANDRAKASAN. Energy-efficient dsps for wireless sensor networks. *IEEE Signal and Processing Magazine*, pages 68–78, Juillet 2002.
- [86] Y. XU, J. HEIDEMANN, and D. ESTRIN. Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 70–84, New York, USA, 2001.
- [87] Z. YANG, M. DONG, L. TONG, and B-M. SADLER. On the mac for optimal information retrieval pattern in sensor networks with mobile access. In *IEEE Military Communications Conference (MILCOM2004)*, volume 1, Octobre 2004.
- [88] Y. YAO and J. GEHRKE. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM SIGMOD Record*, 31(3) :9–18, Septembre 2002.
- [89] F. YE, H. LUO, J. CHENG, S. LU, and L. ZHANG. Sensor networks : A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In *Proceedings of the 8th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks (MOBICOM 2002)*, 2002.
- [90] W. YE, J. HEIDEMANN, and D. ESTRIN. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, page 1567–1576, New York, USA, Juillet 2002.
- [91] M. YOUNIS, M. YOUSSEF, and K. ARISHA. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks. In *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS 2002)*, pages 129–136, 2002.

- [92] O. YOUNIS and S. FAHMY. Heed : A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2004*, Hong Kong, Chine, Mars 2004.
- [93] Y. YU, R. GOVINDAN, and D. ESTRIN. Geographical and energy-aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical Report 01-0023, UCLA Computer Science Departement, Mai 2001.
- [94] Q. ZHAO and L. TONG. Distributed opportunistic transmission for wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2004)*, volume 3, Mai 2004.
- [95] S. ZHUANG and C-G. CASSANDRAS. Optimal dynamic voltage scaling for wireless sensor networks with real-time constraints. In *Proceedings of SPIE Conference on Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI*, pages 8–16, Octobre 2005.