

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

Université A/Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



Mémoire De Fin de cycle

En vue d'obtention du diplôme de master professionnel en
informatique spécialité : Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

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

Réalisé par :

- M^{elle} MAKHMOUKH Dehia
- M^{elle} MELOUK Salima

Soutenu le 28 juin devant le jury composé de :

Président	M^r TOUAZI Djoudi	U. A/Mira Béjaïa.
Examineur	M^r KHAMMARI M.	U. A/Mira Béjaïa.
Examinatrice	M^{elle} SAADI Nora	U. A/Mira Béjaïa.
Encadreur	M^r BAADACHE Abderrahmane	U. A/Mira Béjaïa.

Béjaïa, Juin 2017.

** Remerciements **

Nous tenons dans un premier temps à remercier le bon dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur M^r BAADACHE Abderrahmane pour tout le temps qu'il nous a consacré, pour ses conseils précieux, pour tout son aide et son appui durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier chacun des membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et d'évaluer notre travail. À tous nos enseignants et les membres du département informatique de l'université ABDERRAHMANE MIRA. Que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus chaleureux.

** Dédicaces **

A nos chers parents auxquels nous devons toutes nos reconnaissances.

A nos frères et sœurs.

A nos familles sans exception.

A tous nos chers amis.

A tous ceux qui nous ont apporté de l'aide.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils	3
1.1 Introduction	3
1.2 Nœud capteur	4
1.2.1 Architecture d'un nœud capteur	4
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	6
1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	6
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	7
1.3.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil	7
1.3.4 Facteurs et contraintes de conception des RCSF	8
1.3.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil	10
1.3.6 Applications des réseaux de capteurs	12
1.3.7 Quelques problématiques dans les RCSFs	14
1.4 Conclusion	16

2	Routage dans les réseaux de capteurs sans fil	17
2.1	Introduction	17
2.2	Classification des protocoles de routage dans les RCSFs	17
2.2.1	Classification selon la topologie du réseau	18
2.2.2	Classification selon les fonctions du protocole	20
2.2.3	Classification selon l'établissement de la route	22
2.2.4	Classification selon les paradigmes de communication	23
2.3	Protocoles de routage pour les RCSFs	24
2.4	Comparaison entre quelques protocoles	31
2.5	Conclusion	32
3	Approches de minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	33
3.1	Introduction	33
3.2	Notion de durée de vie d'un réseau	34
3.3	Formes de dissipation d'énergie	34
3.3.1	Énergie de capture	34
3.3.2	Énergie de traitement	35
3.3.3	Énergie de communication	35
3.4	Conservation d'énergie dans les RCSFs	38
3.4.1	Techniques du Duty-cycling	39
3.5	Conclusion	47
4	Approche de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs basée sur l'optimisation des graphes	48
4.1	Introduction	48
4.2	Modèle du réseau	49
4.3	Solution proposée	49
4.3.1	Notions préliminaire des points d'articulation	49
4.3.2	Hypothèses	51
4.3.3	Détail de solution proposée	51
4.4	Simulation	54

4.4.1	Paramètres de simulation	54
4.4.2	Métriques de simulation	54
4.4.3	Résultats de la simulation	55
4.5	Conclusion	56
Conclusion et perspectives		57
Bibliographie		58

Table des figures

1.1	Exemple des noeuds capteurs	4
1.2	Architecture d'un nœud capteur	5
1.3	Exemple d'un réseau de capteur sans fil	7
1.4	Pile protocolaire	11
1.5	Applications des réseaux de capteurs	13
2.1	Classification des protocoles de routage	18
3.1	Graphe de quelques techniques de minimisation de la consommation d'énergie.	39
4.1	Modèle du réseau	49
4.2	Graphe non connexe	50
4.3	Schéma de la solution proposée	52
4.4	L'énergie moyenne restante	55
4.5	La durée de vie du réseau	56

Liste des tableaux

2.1	Tableau comparatif entre quelques protocoles	32
4.1	Tableau des paramètres de simulation	54

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc, composés d'un grand nombre de capteurs matériellement petits et placés généralement près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers des stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base.

Dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est une contrainte très cruciale puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile, voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent principalement sur les moyens de réduire au minimum l'énergie consommée dans la communication de données de sorte à maximiser la durée de vie du réseau. Ces travaux ne sont pas suffisamment efficaces et robustes, ce qui nous a motivé à travailler sur la problématique de l'énergie afin de proposer une solution qui minimise la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau en conséquence. Notre point de départ était l'étude analytique et critique des solutions existantes, ensuite nous proposons une nouvelle approche de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs basée sur la notion des points d'articulation utilisée dans la théorie des graphes. L'idée consiste à modéliser le réseau par un graphe et chercher les points d'articulation sur le graphe pour obtenir un graphe optimal et cela on appliquant l'algorithme de recherche des points d'articulation sur

le graphe pour en avoir un graphe connexe, les autres nœuds éliminés sont mis en veille, de ce fait, l'énergie globale du réseau sera minimisée et conservée.

Notre mémoire est structuré autour de quatre chapitres. Au cours du premier chapitre, nous nous intéresserons aux réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, nous présenterons les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil, ainsi que quelques problématiques dans ces derniers. Quant au second chapitre, nous présenterons les principaux protocoles de routage utilisés dans ces réseaux, ainsi que leurs classifications et une comparaison entre chacun d'eux. Dans le troisième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les approches proposées dans la littérature pour minimiser la consommation d'énergie dans un réseau de capteur. En particulier, nous allons définir la durée de vie d'un réseau de capteurs, et énumérer les formes de dissipation énergétique, ensuite nous allons résumer les différentes approches de minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs. Dans le dernier chapitre, nous présenterons notre solution pour la minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Le mémoire s'achève par une conclusion qui récapitule notre contribution.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont parmi les technologies les plus importantes de nos jours. Ces réseaux sont constitués d'un grand nombre de nœuds qui sont des capteurs. Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Ce type de réseau est utilisé par plusieurs applications telle que les applications militaires, environnementales, industrielles, médicales, etc. Ces applications ont des exigences plus ou moins différentes, particulièrement en terme de sécurité et conservation d'énergie.

Dans ce premier chapitre, nous allons d'abord présenter l'architecture et quelques modèles d'un nœud capteur, ensuite nous introduisons les réseaux de capteurs, en particulier, leur architecture et caractéristiques, les facteurs pris en compte dans la conceptions de ce genre de réseau, la communication ainsi que les domaines d'applications, et finalement une conclusion.

1.2 Nœud capteur

Un nœud capteur (voir figure 1.1 [46]) est un dispositif physique de taille réduite doté d'unités lui permettant de relever, de traiter et de transmettre des informations de l'environnement dans lequel il est déployé. Les capteurs sont peu coûteux, mais limités en termes de capacité (mémoire, calcul, énergie)[58]. Les capteurs sans fil sont capables de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Les progrès conjoints de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux [23].

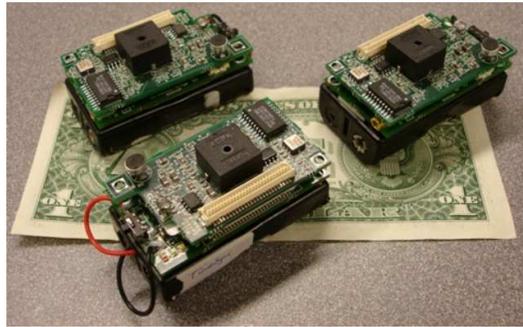


FIGURE 1.1 – Exemple des noeuds capteurs

1.2.1 Architecture d'un nœud capteur

Comme illustré dans la figure 1.2 [58], un capteur est composé de quatre unités de base : l'unité de captage, de traitement, de transmission et l'unité de contrôle d'énergie[29, 58].

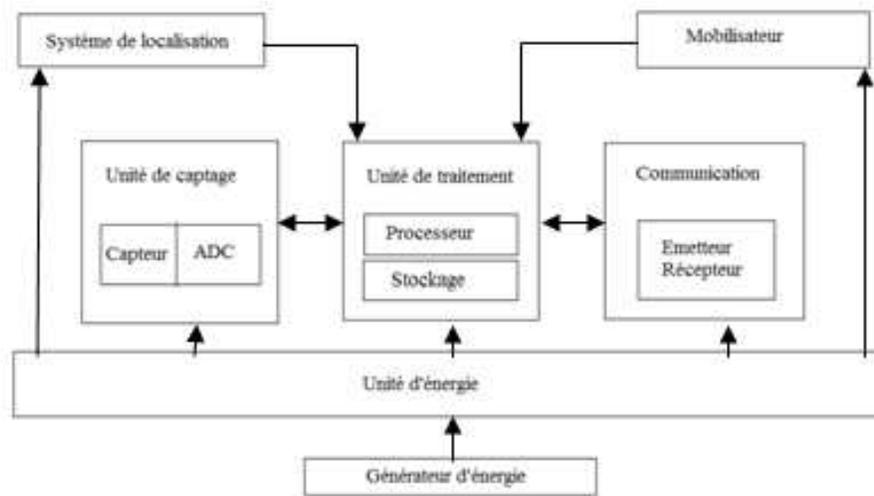


FIGURE 1.2 – Architecture d'un nœud capteur

- **Unité de captage** : Elle est composée de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters). Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- **Unité de traitement** : Elle est composée de deux interfaces : une avec unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition et stocker les données collectées.
- **Unité de communication** : Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium de communication sans fil (radio, infrarouge, optique, etc.).

- **Unité de contrôle d'énergie** : Un capteur est muni d'une ressource énergétique (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. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau.

- **Système d'exploitation**

TinyOS : Est un système d'exploitation open-source spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil, développé par l'université américaine de Berkeley. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC, langage orienté composant proche du C, et la bibliothèque de composants de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données [17, 13].

1.3 Réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est l'une des technologies de la nouvelle génération de réseaux informatiques et télécommunications dans ce qui suit nous allons mettre l'action sur les différentes notions concernant ces réseaux.

1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux spontanés constitués de nœuds déployés en grand nombre en vue de collecter et de transmettre des données vers un ou plusieurs points de collecte, et ce de façon autonome. Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents capables d'accomplir trois tâches complémentaires : Le prélèvement d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs déployés de manière aléatoire pour une application, forme un réseau de capteurs [3].

1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Tous les capteurs respectent globalement la même architecture basée sur un noyau central autour duquel s'articulent les différentes interfaces d'entrée-sortie, de communication et d'alimentation. Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs qui sont organisés en champs "Sensor Fields". Chacun de ces nœuds a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud passerelle par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le nœud passerelle transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central pour analyser ces données et prendre des décisions. La figure 1.3 [13] montre un exemple d'un réseau de capteurs sans fil [28, 5].

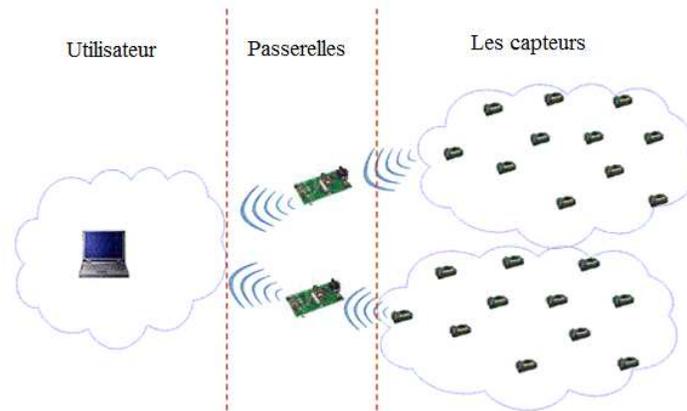


FIGURE 1.3 – Exemple d'un réseau de capteur sans fil

1.3.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements distants, dangereux et inaccessibles. Nous citons quelques caractéristiques de ces réseaux :

- **Durée de vie limitée** : Les RCSF sont destinés à relever des informations dans des environnements hostiles auxquels l'homme n'a pas toujours accès. C'est pourquoi une fois déployés, les capteurs sont autonomes (généralement

leurs batteries ne peuvent pas être rechargées ou remplacées). Leur durée de vie dépend donc de la durée de vie de leur batterie [38].

- **Ressources limitées** : Les capteurs sont des objets communicants limités en termes de bande passante (débit de transmission), de puissance de calcul, de mémoire disponible et d'énergie embarquée.
- **Communication " tous-vers-un " :** " many-to-one", un modèle de trafic très courant dans les réseaux de capteurs où chaque capteur peut recevoir des informations de plusieurs nœuds [1, 19].
- **Absence d'infrastructure** : Les réseaux de capteurs sans fil comme tous réseaux ad hoc, occupent des zones aménagées indépendamment d'une quelconque infrastructure [1].
- **Connectivité** : La plupart des RCSF sont très denses. Pourtant, le déploiement, la mobilité et les défaillances font varier la topologie du réseau, dont la connectivité n'est pas toujours assurée [5].

1.3.4 Facteurs et contraintes de conception des RCSF

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF.

- **La tolérance aux fautes** : La tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau en présence de fautes [58].
- **Facteur d'échelle (Scalabilité)** : Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données [22].

- **Coûts de production** : Souvent les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel [28, 22].
- **Environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, etc. Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées [58].
- **Topologie de réseau** : En raison de leur éventuel mobilité la topologie d'un réseau de capteurs peut changer d'une manière aléatoire et imprévisible. [28, 22] :
- **Contraintes matérielles** : La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau, etc) qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- **Médias de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth et les communications radio Zig Bee [58, 42].
- **Consommation d'énergie** : Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie. Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts). chaque nœuds collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes

en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [58, 28].

1.3.5 Communication dans les réseaux de capteurs sans fil

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter des données et de les router vers une ou plusieurs stations de base (Sink nodes). Ce dernier est un point de collecte de données capturées. Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau [28, 24].

- **Modèle en couche**

La pile protocolaire consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau afin de permettre aux différents constructeurs de mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle (Figure 1.4) [28] comprend 5 couches ayant les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que 3 couches pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs). Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leurs niveaux d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle qui est au dessus et celle qui est au dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle du niveau supérieur.

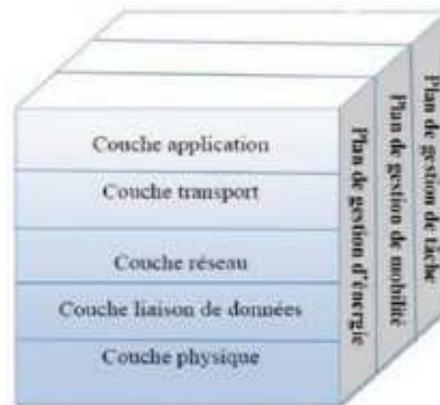


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire

- **Le rôle des couches**

- **Couche physique** : Doit assurer des techniques d'émission, de réception et de la modulation de données d'une manière robuste.

- **Couche liaison de données** : Spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds à une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs de l'accès au média. Elle assure aussi, la liaison point à point et multi points dans un réseau de communication.

- **Couche réseau** : Dans cette couche, le but principal est de trouver une route et une transmission fiable des données, captées, des nœuds capteurs vers le puits " sink " en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs.

- **Couche transport** : Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

- **Couche application** : Elle assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

- **Plans de gestion :**

Les plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâche, contrôlent l'énergie, le mouvement et la distribution des tâches au sein d'un nœud capteur. Ces plans aident les nœuds capteurs à coordonner la tâche de captage et minimiser la consommation d'énergie. Ils sont donc nécessaires pour que les nœuds capteurs puissent collaborer ensemble, acheminer les données dans un réseau mobile et partager les ressources entre eux en utilisant efficacement l'énergie disponible. Ainsi, le réseau peut prolonger sa durée de vie.

- **Plan de gestion d'énergie :** Contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint la radio afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut plus participer au routage. L'énergie restante est donc réservée au captage.

- **Plan de gestion de mobilité :** Détecte et enregistre le mouvement du nœud capteur. Ainsi, un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le nœud peut garder trace de ses nœuds voisins. En déterminant leurs voisins, les capteurs peuvent lancer l'utilisation de leur énergie et la réalisation de tâche.

- **Plan de gestion de tâches :** Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent prolonger la durée de vie du réseau.

1.3.6 Applications des réseaux de capteurs

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, etc.) et

l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs [28]. Les RCSF peuvent être utilisés dans plusieurs applications (Figure 1.5) [13]. Parmi elles, nous citons :

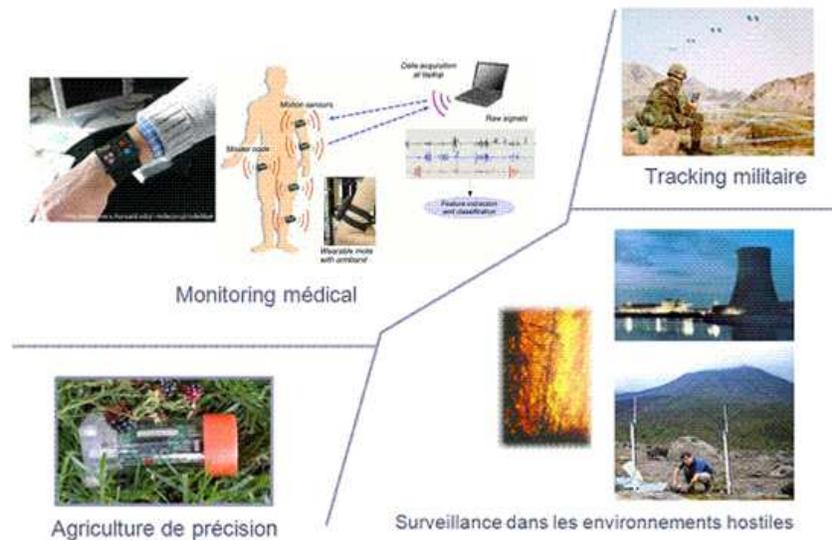


FIGURE 1.5 – Applications des réseaux de capteurs

– **Applications militaires** : Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être considérés comme une partie intégrale des systèmes C4ISR (Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting). Nous pouvons citer parmi les applications militaires : la surveillance du champ de bataille, examen des forces et terrains de l'ennemi, estimation des dégâts de la bataille, détection et reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques [28, 5].

– **Applications médicales** : Il existe déjà dans le monde médical, des gélules multi-capteurs pouvant être avalées qui permettent, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain. L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de

quelques maladies[5].

– **Applications environnementales** : Des capteurs de température peuvent être dispersés à partir d’avions dans le but de détecter d’éventuels problèmes environnementaux dans le domaine couvert par les capteurs dans une optique d’intervenir à temps afin d’empêcher que d’éventuels incendie, inondation, volcan ou tsunami ne se produisent [40, 12].

– **Applications commerciales** : Pour les entreprises, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu’au produit final livré [40].

– **Agriculture** : Des nœuds peuvent être incorporés dans la terre. On peut ensuite questionner le réseau de capteurs sur l’état du champ (déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité). On peut aussi imaginer équiper des troupeaux de bétail de capteurs pour connaître en tout temps, leur position ce qui éviterait aux éleveurs d’avoir recours à des chiens de berger [58].

– **Applications domestiques** : Comme la technologie progresse, les nœuds capteurs intelligents et actionneurs peuvent être embarqués dans des dispositifs, comme l’aspirateur, micro-onde, réfrigérateurs. Ces capteurs dans les dispositifs domestiques peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe par Internet ou satellite [40].

1.3.7 Quelques problématiques dans les RCSFs

Les recherches dans le domaine des réseaux de capteurs ont révélé plusieurs problématiques, parmi les problématiques cruciales, nous pouvons citer :

– **Routage** : le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d’un certain critère de performance.

D'où les protocoles de routage conçus doivent, en plus de leurs fonctions classiques, participer à la synthèse et l'agrégation des données retournées aux utilisateurs, tout en considérant d'autres facteurs tels que les limitations matérielles, la mobilité et la consommation d'énergie. En assurant un routage performant en termes de minimisation de la consommation de l'énergie, du choix des routes optimales pour l'acheminement de l'information d'un capteur à la station de base et vice versa, de réduction du délai de livraison des paquets...etc. Ainsi le réseau doit passer à l'échelle sans que ses performances se dégradent [51].

– **Couche MAC** : la spécificité des réseaux de capteurs sans fil nécessite le développement de nouveaux protocoles MAC qui s'adaptent aux contraintes imposées par ces réseaux. Ceci dans le but d'améliorer le débit, minimiser la consommation d'énergie, optimiser le partage du médium ainsi que minimiser le délai de livraison des paquets [37].

– **Diffusion de l'information** : les protocoles de diffusion conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte de leurs spécificités ainsi que de leurs contraintes intrinsèques imposées [37].

– **Sécurité** : Comme les nœuds sont dispersés dans une zone publique, ils doivent être capables de maintenir, privées, les informations qu'ils recueillent. Par conséquent, pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité et d'intégrité doivent être mis en place au sein de leur communauté. La puissance de calcul limitée des capteurs ouvre de véritables défis pour concevoir des algorithmes de cryptographie et des politiques de confiance spécifiques à ces réseaux [52].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini un réseau de capteurs sans fil, son architecture et ses domaines d'applications. Nous avons cité ses principales caractéristiques, ainsi que les différents facteurs de conception. Nous avons présenté les différentes problématiques révélées dans ce domaine, tel que le routage. Ce dernier est considéré parmi les problèmes posés à l'heure actuelle dans ce type de réseaux.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les principaux protocoles de routage utilisés dans ces réseaux, ainsi que leurs classifications.

Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

Le routage dans les RCSFs forme un axe de recherche intéressant, ce qui a permis de proposer de nombreux protocoles de routage. Mais ils ont tous un objectif commun : Assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant d'étendre la durée de vie du réseau. Cela nécessite la prise en compte des caractéristiques des RCSFs et des exigences des applications pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

Dans ce deuxième chapitre, nous faisons une étude bibliographique sur les protocoles de routage proposés pour les RCSFs. Vu leur multiplicité, il nous semble important de commencer par leur classification qui les groupe suivant un certain nombre de critères, ensuite nous présentons quelques protocoles de routage ainsi qu'une comparaison entre eux.

2.2 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

Dans les réseaux de capteurs sans fil, chaque nœud communique directement avec son voisin, et pour communiquer avec d'autre nœud, il lui est nécessaire de faire

passer les données par d'autres nœuds qui se chargeront de les acheminer. Pour cela, il est primordial que les nœuds se situent les uns par rapport aux autres et soient capables de construire des liens entre eux. L'objectif des protocoles de routage est de trouver des chemins qui mènent vers la destination et qui optimisent la métrique de consommation d'énergie, ils peuvent être classés selon plusieurs critères. La Figure 2.1 [60] illustre une classification qui se base sur quatre critères : la topologie du réseau, fonction du protocole, l'établissement de la route, les paradigmes de communication.

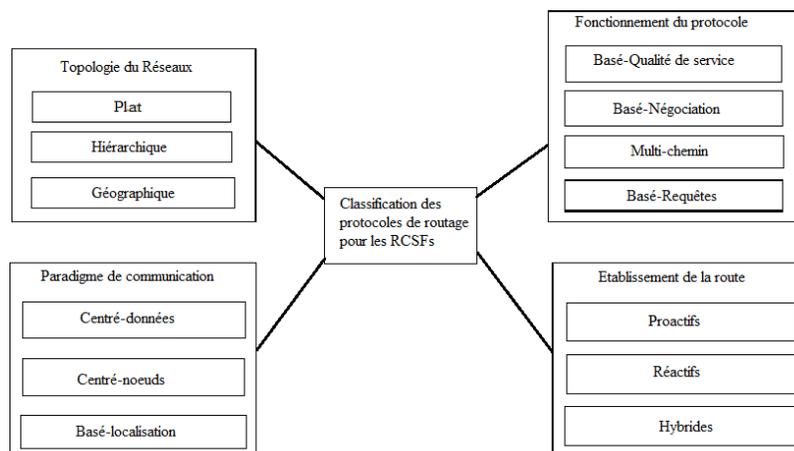


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage

2.2.1 Classification selon la topologie du réseau

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Globalement il existe trois topologies dans les RCSFs : la topologie plate, la topologie hiérarchique et la topologie géographique.

2.2.1.1 Topologie plate

Dans une topologie plate, tous les nœuds capteurs possèdent le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité des protocoles routages, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, Les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routage. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds et d'une manière distribuée nécessitant ainsi un grand nombre de messages de contrôle [6].

2.2.1.2 Topologie hiérarchique

Dans une topologie hiérarchique, les nœuds ont des différents rôles. En effet, certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Une des méthodes les plus utilisées dans cette topologie est le clustering. Il consiste en un partitionnement du réseau en groupes appelés clusters. Un cluster est constitué d'un chef (clusterhead) et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef ou pas. Cette topologie présente beaucoup d'avantages tels que l'agrégation des données collectées ainsi qu'une grande scalabilité. Son inconvénient majeur est la surcharge des clusterheads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les clusterheads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacités de traitement ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et aussi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes. les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS hiérarchique, LEACH-R sont des exemples de protocoles de routage hiérarchique[5].

2.2.1.3 Topologie géographique

La plupart des protocoles de routages dans les réseaux de capteurs nécessite la localisation des nœuds capteurs. En générale ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds sans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région de 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. Les protocoles suivants : GAF, MFR, SPEED, TSRP sont des exemples de protocoles de cette couche [46].

2.2.2 Classification selon les fonctions du protocole

Le mode de fonctionnement définit la manière avec laquelle les données sont propagées dans le réseau. Selon ce critère, les protocoles de routage peuvent être classifiés en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service (Quality of Service " QoS " based routing), routage basé sur les requêtes (Query-based routing), routage multi-chemins (Multi-path routing), et routage basé sur la négociation (Negociation based routing) [6].

2.2.2.1 Routage basé sur la Qualité de Service

Dans les protocoles de routage basés sur QoS, le réseau doit équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité de données. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques de QoS, par exemple, retard, énergie, largeur de bande passante, etc. Les protocoles de cette approche sont très recommandés pour les applications de surveillance (centrales nucléaires, applications militaires, etc.).

2.2.2.2 Routage basé sur les requêtes

Dans ce type de routage, le puits génère des requêtes afin d'interroger les capteurs. Ces requêtes sont exprimées soit par un schéma valeur-attribut ou bien en utilisant un langage spécifique (par exemple SQL : Structured Query Language). Les nœuds qui détiennent les données requises doivent les envoyer au nœud demandeur à travers le chemin inverse de la requête. Les requêtes émises par le puits peuvent aussi être ciblées sur des régions spécifiques du réseau.

2.2.2.3 Routage basé sur les multi-chemins

Dans cette catégorie, les protocoles de routage utilisent des chemins multiples plutôt qu'un chemin simple afin d'augmenter la performance du réseau. La fiabilité d'un protocole peut être mesurée par sa capacité à trouver des chemins alternatifs entre la source et la destination en cas de défaillance du chemin primaire. Pour cette raison, certains protocoles construisent plusieurs chemins indépendants, c-à-d. : ils ne partagent qu'un nombre réduit (voire nul) de nœuds. Malgré leur grande tolérance aux pannes, ces protocoles requièrent plus de ressources énergétiques et plus de messages de contrôle.

2.2.2.4 Routage basé sur la négociation

En détectant le même phénomène, les nœuds capteurs inondent le réseau par les mêmes paquets de données. Ce problème de redondance peut être résolu en employant des protocoles de routage basés sur la négociation. En effet, avant de transmettre, les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales, appelés métadonnées. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent déjà de la donnée à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données.

2.2.3 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage, nous distinguons trois catégories de protocoles de routage : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides [27].

2.2.3.1 Protocoles proactifs

Utilisent l'échange régulier de messages de contrôle pour maintenir au niveau de chaque nœud des tables de routage (qui associent à chaque destination ou groupe de destinations un voisin direct par lequel les paquets doivent être relayés) vers toute destination atteignable depuis celui-ci. Ces tables sont maintenues même quand les routes ne sont pas utilisées. Cette approche permet de disposer d'une route vers chaque destination immédiatement au moment où un paquet doit être envoyé. Les protocoles proactifs sont adaptés aux applications qui nécessitent un prélèvement périodique des données. Et par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité, et n'enclencher leur dispositif de capture qu'à des instants particuliers.

2.2.3.2 Protocoles réactifs

Dits aussi protocoles de routage à la demande, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsqu'un nœud a besoin d'une route, une procédure de découverte globale est lancée. Cette procédure s'achève par la découverte de la route ou lorsque toutes les permutations de routes possibles ont été examinées. La route trouvée est maintenue par une procédure de maintenance de routes jusqu'à ce que la destination soit inaccessible à partir du nœud source ou que le nœud source n'aura plus besoin de cette route.

2.2.3.3 Protocoles hybrides

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

2.2.4 Classification selon les paradigmes de communication

Le paradigme de communication détermine la manière dont les nœuds sont interrogés. Dans les RCSFs, il existe trois paradigmes de communication : centré-nœuds, centré-données et basé sur la localisation[39].

2.2.4.1 Centré-nœuds (Node-centric)

Ce paradigme est celui employé dans les réseaux conventionnels, où il est nécessaire de connaître et d'identifier les nœuds communicants (comme l'adresse IP). Les réseaux ad hoc utilisent ce genre de paradigme, qui s'intègre bien avec l'utilisation de ce type d'environnement. Cependant, pour les réseaux de capteurs, un routage basé sur une identification individuelle des nœuds ne reflète pas l'usage réel de réseau. Pour cela, un autre paradigme a été introduit : data centric. Néanmoins, le paradigme node centric n'est pas à écarter totalement, car certaines applications nécessitent une interrogation individuelle des capteurs.

2.2.4.2 Centré-données (Data-centric)

Ce paradigme suppose qu'il est difficile d'avoir des identifiants comme les adresses MAC ou IP pour pouvoir communiquer entre les nœuds capteurs . Ainsi, le routage ne se fait pas en fonction d'une adresse de destination, mais suivant les

données disponibles au niveau des capteurs. Ces données seront propagées de proche en proche pour arriver aux nœuds puits.

2.2.4.3 Basé-localisation (location-based)

Dans cette approche, les décisions de routage sont établies selon la position des nœuds. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base de la puissance du signal arrivé. Un tel type de routage nécessite que les nœuds aient connaissance de leurs positions géographiques. Par conséquent, ce type de mécanismes nécessite un déploiement d'une solution de positionnement, dont le degré de précision requis dépend de l'application ciblée. L'utilisation du GPS reste trop coûteuse pour un RCSF. Néanmoins, d'autres méthodes de localisation et de positionnement des capteurs ont été développées comme : la triangulation.

2.3 Protocoles de routage pour les RCSFs

Dans ce qui suit nous allons décrire les principaux protocoles de routages proposés dans la littérature pour les RCSFs :

- **LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy**

ChandraKasan & al. proposent dans [54] le protocole LEACH comme un nouveau protocole de routage efficace en consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs. Les auteurs présument que ce protocole peut étendre la durée de vie du réseau par un facteur de 8, comparé aux autres protocoles basés sur le routage multi-sauts ou a regroupement statique. LEACH est un protocole basé sur les groupes, dans le quel les chefs de groupes élus collectent les données à partir de tous les nœuds capteurs appartenant à leur groupe, agrègent les données rassemblées par des procédures de fusion, et transmettent ces données directement à la station de base. Les chefs de groupes élus demeurent ainsi pour une période de temps appelée " round ". Au début de chaque round, chaque nœud détermine la

possibilité d'être un chef de groupe pendant la période en cours, s'il décide de l'être, il annonce sa décision à tous ses nœuds voisins. Les autres nœuds qui décident de ne pas être un chef de groupe, se joignent à l'un des chefs élus après avoir reçu leurs décisions, la sélection du chef de groupe adéquat se base sur plusieurs paramètres prédéterminés tel que le rapport signal/bruit (SNR).

Dans le protocole LEACH, tous les nœuds sont considérés statiques, homogènes, et régis par la contrainte de consommation d'énergie. Ces nœuds sont prévus pour capter leur environnement d'une manière continue, et ont, donc, un taux de données fixe à transmettre, cette hypothèse n'est pas conforme au cas des réseaux de capteurs déployés pour la surveillance des objets mobiles tel que ceux utilisés pour le contrôle de trafic des véhicules.

- **PEGASIS : Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems**

PEGASIS [10, 4] est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes plutôt que des clusters de nœuds de capteurs afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre des données à la station de base. L'idée de PEGASIS est qu'il utilise tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données avec ses plus proches voisins. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Donc, chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de nœuds au niveau de la station de base .

- **TEEN : Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol** et **APTEEN : Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol**

– TEEN [34] et APTEEN [35] conviennent pour les applications critiques. Dans les deux protocoles, le facteur clé est la valeur de l'attribut mesuré. La caractéristique supplémentaire d'APTEEN est la capacité de changer la périodicité

et les paramètres de TEEN en fonction des besoins des utilisateurs et des applications.

- TEEN est conçu pour être sensible à des changements soudains des attributs telle que la température. La réactivité est importante pour les applications critiques dont le réseau fonctionne dans un mode réactif. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte [34].
- APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodiques de données et qui réagit aux événements critiques. Quand la station de base forme des clusters, les clusters head diffusent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les nœuds. Le cluster-head effectue également l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie [35].

- **GAF : Geographic Adaptive Fidelity**

GAF [56] est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds. Il est conçu principalement pour les réseaux mobiles ad hoc, mais peut être applicable aux réseaux de capteurs. La localisation des nœuds dans GAF pourrait être fournie à l'aide d'un GPS ou d'autres techniques de localisation [44]. Il consiste à former des grilles virtuelles de la zone concernée en partitionnant cette zone où les nœuds sont déployés en de petites zones telles que, pour deux grilles adjacentes G_x et G_y , tous les nœuds de G_x peuvent communiquer avec tous les nœuds G_y . Ainsi, ce système de partitionnement GAF assure la fidélité du routage car il existe au moins un chemin entre un nœud et la station de base.

GAF peut augmenter considérablement la durée de vie du réseau. En effet, un seul nœud dans chaque grille reste à l'état actif en faisant passer les autres nœuds de la grille à l'état de sommeil pour une certaine période de temps tout en assurant la fidélité du routage. Cependant, dans certains environnements où les nœuds sont fortement mobiles, la fidélité du routage pourrait être réduite si un nœud actif quitte la grille. Ainsi, le nombre de données perdues sera

important.

- **GEAR : Geographic and Energy Aware Routing**

Le protocole de routage GEAR [57] a été suggéré par Y. Yu, D. Estrin. Il consiste à utiliser l'information géographique lors de la diffusion des requêtes aux régions cibles car les requêtes contiennent souvent des données géographiques. L'idée est de restreindre le nombre de données dans la diffusion dirigée en prenant en considération uniquement une certaine région, plutôt que d'envoyer les données à l'ensemble du réseau. Avec le protocole GEAR, chaque nœud maintient le coût pour atteindre la destination en passant par ses voisins. Ce coût est divisé en deux parties : un coût estimé et un coût d'apprentissage. Le coût estimé est une combinaison de l'énergie résiduelle et de la distance jusqu'à destination. Le coût d'apprentissage est un raffinement du coût estimé qu'un nœud dépense pour le routage autour des trous dans le réseau. Un trou se forme quand un nœud n'a pas de voisin proche par lequel il peut atteindre la région cible. S'il n'y a pas de trous, le coût estimé est égal au coût d'apprentissage. Le coût d'apprentissage se propage d'un saut à chaque fois qu'un paquet atteint la destination [44, 57].

- **SPIN : Sensor Protocols for Information via Negotiation**

Heinzelman et al [54]. Ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN, reposant sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs. Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation, qui sont :

- L'implosion due à la duplication inutile des réceptions d'un même message.
- Le chevauchement lié au déploiement dense des capteurs. En utilisant l'inondation, les capteurs d'une zone émettront tous la même donnée (ou presque).
- L'ignorance des ressources, car l'inondation ne prend pas en considération les ressources des nœuds.

Ces trois problèmes affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau. Pour les résoudre, SPIN adopte deux principes :

- La négociation : pour éviter le problème d’implosion, SPIN précède l’émission d’une donnée par sa description, en utilisant la notion de métadonnées. Le récepteur aura le choix par la suite d’accepter la donnée ou non. Ce mécanisme permet aussi de régler le problème de chevauchement.
- L’adaptation aux ressources : d’une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d’énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l’énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud.

Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- Lorsqu’un nœud veut émettre une donnée, il émet d’abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d’intérêt. S’il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- En recevant un message REQ, l’émetteur transmet à l’intéressé la donnée sous forme d’un message DATA.

Lorsque le nœud s’aperçoit que son énergie est descendue sous un certain seuil, il change son mode de fonctionnement, et ne répond à aucun message ADV.

- **Diffusion dirigée (Direct Diffusion)** La diffusion dirigée [14] est un protocole important dans le routage data-centric des réseaux de capteurs. L’idée vise à diffuser des données aux nœuds en utilisant un schéma de nommage pour les données.

La raison principale derrière l’utilisation d’un tel système est de se débarrasser des opérations inutiles de routage de couche réseau afin d’économiser l’énergie. La diffusion dirigée suggère l’utilisation de paires attribut-valeur pour les données et les requêtes des capteurs. Afin de créer une requête, un nœud est défini à l’aide d’une liste de paires attribut-valeur comme le nom des objets, l’intervalle, la durée, la zone géographique, etc. Un paquet est diffusé par ce nœud vers la destination à travers ses voisins. Chaque nœud qui reçoit les paquets peut les stocker pour une utilisation ultérieure. Les paquets stockés sont ensuite utilisés pour comparer les données reçues. La requête contient

aussi plusieurs champs de gradient. Un gradient est un lien réponse avec un voisin dont le paquet a été reçu et qui est caractérisé par le débit, la durée et la date d'expiration de données. Ainsi, en utilisant les intérêts et les gradients, les routes sont établies entre la destination et les sources. Plusieurs routes peuvent être établies de telle sorte que l'une d'elle est choisie par renforcement. La destination renvoie le message d'intérêt initial à travers la route choisie. Un intervalle plus petit renforce donc le nœud source sur ce chemin pour envoyer des données plus fréquemment .

- **Inondation (Flooding)**

L'inondation (flooding) est une technique classique qui peut être utilisée pour le routage dans les réseaux de capteurs et dans laquelle chaque nœud recevant une donnée ou un paquet de contrôle le diffuse à tous les nœuds voisins jusqu'à ce que le nombre maximum de sauts pour ce paquet soit atteint ou le paquet arrive à sa destination. L'inondation est une technique réactive qui ne nécessite pas une maintenance coûteuse de la topologie du réseau, ni des algorithmes complexe pour la découverte des routes, mais elle présente plusieurs inconvénients, entre autres :

- L'implosion : cette situation parvient si des messages dupliqués sont envoyés au même nœud.
- Le Chevauchement : si deux nœuds observant la même région sont stimulés en même temps, leurs nœuds voisins recevront des messages dupliqués.
- Ignorance de ressources : la technique d'inondation ne prend pas en compte les ressources d'énergies disponibles. Un protocole efficace en consommation d'énergie, doit prendre en compte à chaque instant la quantité d'énergie disponible.

- **Gossiping**

Un des problèmes de la diffusion est lié à la réception de la même copie du paquet par plusieurs nœuds capteurs et à un moment donné, on peut observer diverses copies du même paquet en train de circuler dans le réseau. Le gossiping a résolu ce problème en sélectionnant un seul nœud pour relayer le paquet.

De cette façon, la consommation énergétique sera faible en comparaison à l'inondation [24].

- **Protocole de routage par rumeur**

Le routage par rumeur [44] est principalement destiné aux applications dont le routage géographique n'est pas adapté. En général, la méthode (diffusion dirigée) utilise l'inondation pour envoyer la requête à l'ensemble du réseau où il n'y a pas de critère géographique pour diffuser les tâches. Toutefois, dans certains cas, peu de données sont demandées par les nœuds, donc l'utilisation d'inondation est inutile.

L'idée clé de cette méthode est de trouver les routes pour les requêtes vers les nœuds qui ont observé un événement particulier, plutôt que d'inonder tout le réseau pour récupérer des informations sur les événements survenus. Afin de diffuser un événement sur le réseau, l'algorithme de routage par rumeur emploie des paquets appelés agents. Quand un nœud détecte un événement, il ajoute cet événement à sa table locale, appelée table d'événements et génère un agent. Cet agent parcourt le réseau afin de propager des informations sur des événements locaux pour les nœuds distants. Quand un nœud génère une requête pour un événement, les nœuds qui connaissent le chemin, répondent à la requête en inspectant leur table d'événements. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'inonder tout le réseau, ce qui réduit le coût de communication.

Ce routage n'utilise qu'un seul chemin entre la source et la destination au lieu de la diffusion dirigée où les données peuvent être acheminées par des routes multiples. Il peut réaliser des économies d'énergie significatives par rapport à la méthode d'inondation et peut également préserver la vie du nœud.

- **SAR : Sequential Assignment routing**

Afin de sélectionner une route, Le protocole (SAR) [25, 24] 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 (faible débit, grand délai de transmission) 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.

2.4 Comparaison entre quelques protocoles

La Tableau 2.1 représente un comparatif de quelques protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil suivant les critères cités ci-dessous :

- **Agrégation des données** : C'est un nouveau paradigme pour le routage dans les réseaux de capteurs. L'idée de base consiste à combiner les données provenant de différents nœuds sources en éliminant les redondances existantes et en minimisant aussi le nombre de transmissions possibles pour économiser la quantité d'énergie consommée.
- **Mobilité** : Un autre paramètre qui semble intéressant à prendre en considération lors de comparaison entre ces protocoles de routage, est la mobilité des nœuds. Cependant, il existe des situations ou des environnements où les nœuds capteurs doivent être mobiles. Dans ce cas, la mise à jour fréquente

de la position du nœud et la propagation de cette information dans le réseau peut considérablement diminuer l'énergie des nœuds.

- **Scalabilité** : La scalabilité d'un protocole de routage est son aptitude à conserver ses propriétés fonctionnelles malgré le changement de la taille du réseau.
- **Efficacité énergétique** : C'est une mesure du rapport des paquets totale délivrée à la destination et l'énergie totale consommée par les nœuds du réseau.

Protocole \ Critère	Mobilité	Scalabilité	Agrégation	Efficacité
LEAUCH	Station de base fixe	Bonne	Oui	Elevé
PEGASIS	Station de base fixe	Bonne	Non	Elevé
TEEN	Station de base fixe	Bonne	oui	Elevé
APTEEN	Station de base fixe	Bonne	Oui	Très élevé
GEAR	limitée	limité	Non	Moyene
SPINE	possible	Limitée	Oui	Faible
Diffusion dirigée	Limitée	Limitée	Oui	Faible
Flooding	Non	Bonne	Non	Moyenne
Gossiping	Non	Bonne	Non	Moyenne
Rumor Routing	Très limitée	Bonne	Oui	Faible
SAR	Non	Limitée	oui	Faible

TABLE 2.1 – Tableau comparatif entre quelques protocoles

2.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir les différentes familles de protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, et nous avons donné le principe de base des protocoles les plus répandus.

Nous nous intéresserons par la suite aux différentes approches de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs.

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

3.1 Introduction

La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs. En effet, maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

Nous présentons dans cette partie un état de l'art sur les approches proposées dans la littérature pour minimiser la consommation d'énergie dans un réseau de capteur. En particulier, nous allons définir la durée de vie d'un réseau de capteurs, et énumérer les formes de dissipation énergétique, ensuite nous allons résumer les différentes approches de minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs.

3.2 Notion de durée de vie d'un réseau

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. Selon la discussion de Akyildiz et al. [24], la quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud-capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données.

3.3 Formes de dissipation d'énergie

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication [54, 25, 32, 45].

3.3.1 Énergie de capture

La capture est effectuée par les composants d'acquisition qui traduisent les phénomènes physiques en signal électrique. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par les modules de traitement et communication. L'énergie consommée lors de la capture peut être réduite en utilisant des composants à faible consommation d'énergie. Une autre façon de réduire l'énergie consommée lors de la capture consiste à réduire la durée de capture

et supprimer les captures jugées redondantes et inutiles [31].

3.3.2 Énergie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergies : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [31].

3.3.3 Énergie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance, quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [26, 41].

Lors de la communication, plusieurs facteurs interviennent dans la dissipation d'énergie, parmi ces facteurs on cite :

3.3.3.1 Mode de livraison des données

Le mode de livraison de données a un impact direct sur le taux des données transmises et par conséquent sur la durée de vie du réseau. La consommation d'énergie diffère d'un mode de livraison à un autre. Par exemple, dans une application de surveillance d'un événement ou d'un objet, les nœuds doivent

contrôler leur radios continuellement, ce qui consomme plus d'énergie, par contre dans une application de surveillance du feu dans une forêt, les données transmises ne sont pas fréquentes, ce qui consomme moins d'énergie.

3.3.3.2 Module radio

Pour assurer la communication entre les éléments du réseau, les capteurs utilisent leur modules radio. Ce module est le composant qui consomme le plus d'énergie. Il opère dans quatre modes de fonctionnement : actif, émission, réception et sommeil.

- **Mode actif** : le nœud n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- **Mode émission** : la radio transmet un paquet.
- **Mode réception** : la radio reçoit un paquet.
- **Mode Sommeil** : la radio est mise hors tension.

3.3.3.3 Source de surconsommation d'énergie

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC [25].

- **Retransmission** : Les nœuds capteurs partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. L'information perdue doit être retransmise, ce qui consomme d'avantage l'énergie.
- **Ecoute active** : L'écoute au canal de communication pour recevoir un éventuel paquet peut engendrer une perte importante de l'énergie des nœuds. Pour éviter ce problème, il faut chavirer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.

- **Sur-écoute(overhearing)** :Le phénomène de sur-écoute se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. La sur-écoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.
- **Surcharge(overhead)** : Généralement, les protocoles MAC [32] s'échangent des messages de contrôle pour assurer les différentes fonctionnalités telles que : la signalisation, la connectivité et l'établissement d'un plan d'accès pour éviter les collisions. Tous ces messages échangés nécessitent une énergie additionnelle. Par exemple, les trames de contrôle RTS/CTS(Request to Send/Clear to send) ne véhiculent aucune informations alors que leurs transmission consomme l'énergie.
- **Surémission** : Il s'agit du phénomène où le nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. Ces données envoyées inutilement consomment une énergie additionnelle considérable.
- **Taille des paquets** : La taille des paquets échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) générés augmente d'overhead.

3.3.3.4 Modèle de conservation d'énergie

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans le domaine de la radio à faible consommation énergétique. Heinzelman et al[54]. Proposent un modèle où la radio absorbe $E_{elec} = 50nJ/bit$ pour exécuter des circuits émetteur/récepteur $E_{amp} = 100bit/m^2$ pour l'amplification de transmission. Ainsi, pour transmettre un message de k bits sur une distance d , la radio dépense :

$$E_{tx} = k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^2$$

Pour recevoir un message de k bits de récepteur consomme :

$$E_{rx} = k \times E_{elec}$$

Ou : E_{elec} est l'énergie électronique. E_{amp} est l'énergie nécessaire pour l'amplification. Selon ce modèle, les protocoles doivent minimiser la distance de transmission et le nombre des opérations d'émission et de réception pour chaque message.

3.4 Conservation d'énergie dans les RCSFs

Des mesures expérimentales ont montré que, généralement, c'est la transmission des données qui est la plus consommatrice en énergie, et de façon significative, les calculs, eux, consomment très peu [45]. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par le module de traitement et, par-dessus tout, le module de communication. Dans d'autres cas, l'énergie dépensée pour la détection peut être comparable, ou supérieure à celle nécessaire à la transmission de données. En général, les techniques d'économie d'énergie se concentrent sur deux parties : la partie réseau (i.e., la gestion d'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception de protocoles réseau), et la partie détection (i.e., des techniques sont utilisées pour réduire la fréquence de l'échantillonnage coûteux en énergie).

Le graphe suivant classifie quelques techniques de minimisation de la consommation d'énergie.

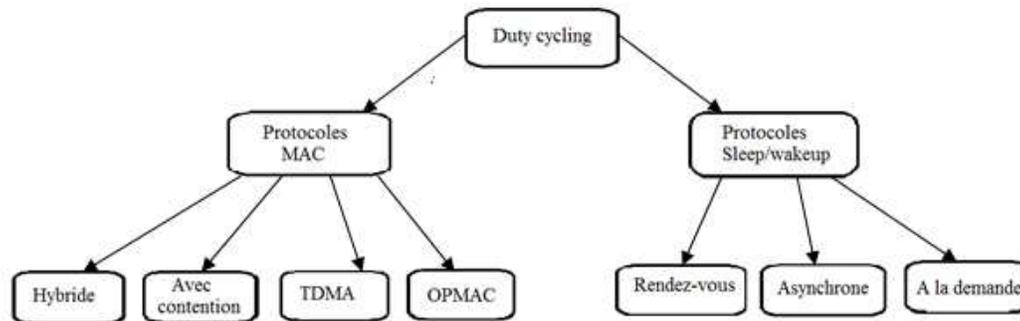


FIGURE 3.1 – Graphe de quelques techniques de minimisation de la consommation d'énergie.

3.4.1 Techniques du Duty-cycling

Cette technique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs. Comme les nœuds-capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle.

3.4.1.1 Protocoles Sleep/Wakeup

Comme mentionné précédemment, un régime sleep/wakeup peut être défini pour un composant donné (i.e. le module Radio) du nœud-capteur. On peut relever les principaux plans sleep/wakeup implantés sous forme de protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (i.e. au niveau de la couche réseau ou de la couche application) [8]. Les protocoles sleep/wakeup sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones.

- Les protocoles à la demande utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. A cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à "haut" débit mais à plus forte consommation pour la communication de données). Le protocole STEM (SparseTopology and Energy Management) [49] , par exemple, utilise deux radios.
- Une autre solution consiste à utiliser une approche de rendez-vous programmés. L'idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous.
- Enfin, un protocole sleep/wakeup asynchrone peut être utilisé. Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et tant qu'il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime sleep/wakeup, aucun échange d'informations n'est alors nécessaire entre les nœuds [43].

3.4.1.2 Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont été proposés, et de nombreux états de l'art et introductions aux protocoles MAC sont disponibles

dans la littérature. Nous nous concentrons principalement sur les questions de gestion d'énergie plutôt que sur les méthodes d'accès au canal. La plupart d'entre eux mettent en œuvre un régime avec un faible duty-cycle pour gérer la consommation d'énergie. Nous avons recensés les protocoles MAC les plus communs en les classant en trois catégories : les protocoles fondés sur TDMA, les protocoles utilisant la contention et les protocoles hybrides.

1. Protocoles MAC reposant sur TDMA

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA, le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de slots de temps. A chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un certain algorithme d'ordonnancement. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de/vers d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un clusterhead qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son cluster (par exemple : Bluetooth [20], LEACH [54] et Energy-aware TDMA-based MAC [33]).

Exemple :TRAMA

Un des protocoles TDMA important et efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil est TRAMA [53]. TRAMA divise le temps en deux parties, une période avec un accès aléatoire et une période avec un accès ordonné. La période d'accès aléatoire est consacrée à la réservation des slots et l'accès au canal est fondé sur la contention. Au contraire, la période d'accès ordonnée est constituée par un certain nombre de slots de temps attribués à un nœud précis. L'algorithme de réservation des slots est le suivant. Tout d'abord, les nœuds cherchent des informations sur un voisinage à deux sauts, qui sont nécessaires pour établir un ordonnancement sans collisions. Ensuite, les nœuds commencent une procédure d'élection afin d'associer chaque slot à un seul nœud. Chaque nœud aura une priorité pour être le propriétaire d'un slot. Cette priorité est calculée avec une fonction de hachage de l'identifiant du nœud et du numéro du slot. Le nœud avec la plus grande priorité devient le propriétaire du slot. Enfin, les nœuds envoient un paquet de synchronisation contenant la liste des voisins destinataires pour les trans-

missions suivantes. Par conséquent, les nœuds peuvent se mettre d'accord sur les slots où ils doivent être éveillés. Les slots inutilisés peuvent être annoncés par leurs propriétaires pour être réutilisés par d'autres. Les protocoles TDMA sont par nature efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument leur radio que lors de leurs propres slots et s'endorment le reste du temps. Toutefois, dans la pratique, les protocoles TDMA ont plusieurs inconvénients qui compensent les avantages en terme d'économie d'énergie. Premièrement, les algorithmes classiques de réservation de slots ont tendance à être complexes, peu flexibles et présentent des problèmes lors du passage à l'échelle. En effet, dans un véritable réseau de capteurs, les changements de topologie sont fréquents (conditions variables du canal, défaillances de nœuds, etc) et la répartition des slots peut être problématique dans de nombreux cas; une approche centralisée peut être adoptée (LEACH). Deuxièmement, ils requièrent une synchronisation très fine et ils sont très sensibles aux interférences. En outre, les protocoles TDMA fonctionnent moins bien que les protocoles avec contention lors d'un trafic faible. C'est pour toutes ces raisons que les protocoles MAC TDMA ne sont pas très fréquemment utilisés dans les réseaux de capteurs.

2. Protocoles MAC avec contention

Les protocoles avec contention sont les plus populaires et représentent la majorité des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils assurent le duty-cycle par une intégration étroite des fonctionnalités d'accès au canal avec un régime sleep/wakeup. La seule différence est que, dans ce cas, l'algorithme sleep/wakeup n'est pas un protocole indépendant.

EXEMPLES :

- **B-MAC** : un des plus populaires est B-MAC (MAC Berkeley), avec une faible complexité et une faible consommation induite par le système d'exploitation TinyOS. L'objectif de B-MAC est de fournir quelques fonctionnalités de base et un mécanisme efficace en énergie pour l'accès au canal. Il met d'abord en œuvre les caractéristiques de base du contrôle d'accès au canal : un algorithme de backoff, une estimation efficace du

canal et des acquittements optionnels. Deuxièmement, pour atteindre un faible duty-cycle, B-MAC utilise un plan sleep/wakeup asynchrone fondé sur l'écoute périodique appelée Low Power Listening (LPL). Les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier l'activité sur le canal. La période entre deux réveils est nommée intervalle de vérification. Après le réveil, les nœuds restent actifs pour un temps de réveil, afin de détecter d'éventuelles transmissions. Contrairement au temps de réveil qui est fixé, l'intervalle de vérification peut être spécifié par l'application. Les paquets B-MAC sont constitués d'un long préambule et d'une charge utile. La durée du préambule est au moins égale à l'intervalle de vérification, afin que chaque nœud puisse toujours détecter une éventuelle transmission au cours de son intervalle de vérification. Cette approche ne nécessite pas que les nœuds soient synchronisés. En fait, quand un nœud détecte l'activité sur le canal, il reste actif et reçoit le préambule en premier puis la charge utile [16].

- **S-MAC** : Un autre protocole MAC multi-sauts célèbre dans les réseaux de capteurs est S-MAC (SensorMAC). Il adopte un régime de communication avec planification par rendez-vous. Les nœuds échangent des paquets de synchronisation afin de coordonner leurs périodes sleep/wakeup. Chaque nœud peut établir son propre plan ou suivre le plan d'un voisin au moyen d'un algorithme distribué. Les nœuds utilisant le même plan forment un cluster virtuel. Un nœud peut éventuellement suivre deux plans s'ils ne se superposent pas, de sorte qu'il puisse faire un pont de communication entre différents clusters virtuels. Le temps d'accès au canal est divisé en deux parties. Dans la période d'écoute, les nœuds échangent des paquets de synchronisation et des paquets de contrôle pour éviter des collisions. Le transfert de données aura lieu dans le reste de la période. Les nœuds source et destination sont éveillés et communiquent entre eux. Les nœuds qui ne sont pas concernés par cette communication peuvent dormir jusqu'à la prochaine période d'écoute. Pour éviter les latences

dans des environnements multi-sauts, S-MAC utilise un plan d'écoute adaptatif. Les paramètres du protocole S-MAC, i.e. les périodes d'écoute et de sommeil, sont constantes et ne peuvent pas être modifiées après le déploiement. Les auteurs proposent alors une version améliorée de S-MAC appelée Timeout MAC (T-MAC) et spécialement conçue pour une charge de trafic variable. Bien que les protocoles MAC fondée sur le duty-cycle soient efficaces en énergie, ils souffrent de la latence du sommeil, i.e., un nœud doit attendre que le récepteur se réveille avant qu'il puisse acheminer un paquet. Cette latence augmente avec le nombre de sauts. En outre, la diffusion de données à partir d'un nœud vers le puits peut connaître un problème d'interruption. En fait, la sensibilité de la radio limite la portée de l'overhearing. Les nœuds en dehors de la portée de l'émetteur ne peuvent donc pas entendre la transmission en cours et se rendorment. C'est pourquoi, dans S-MAC et T-MAC la diffusion de données est limitée à quelques sauts [59].

- **IEEE 802.15.4** : Est un standard à faible débit et à faible puissance pour les réseaux personnels (PAN pour Personal Area Networks). Un PAN est formé d'un PAN coordinator qui gère l'ensemble du réseau et, éventuellement, d'un ou plusieurs coordinateurs qui gèrent les sous-ensembles de nœuds du réseau. D'autres nœuds (ordinaires) doivent s'associer à un coordinateur afin de communiquer. Les topologies de réseau possibles sont l'étoile (saut unique), le cluster-tree et le mesh (multi-sauts). Le standard IEEE 802.15.4 prend en charge deux méthodes d'accès aux différents canaux : un mode beacon-enabled et un mode non-beacon enabled. Le mode beacon enabled fournit un mécanisme de gestion d'énergie sur la base du duty-cycle. Concrètement, il utilise une structure de supertrame qui est délimitée par des balises. D'autres trames de synchronisation sont générées périodiquement par les nœuds coordinateurs. Chaque supertrame consiste en une période active et une période inactive. Dans la période d'activité les dispositifs communiquent

avec le coordonnateur auquel ils sont associés. La période active peut être divisée en une période d'accès avec contention (CAP pour Contention Access Period) et une période sans contention (CFP). Au cours de la CAP un algorithme CSMA/CA discrétisé est utilisé pour accéder au canal, tandis que, durant la CFP, un certain nombre de slots garantis (GTS) peuvent être attribués à chaque nœud. Au cours de la période inactive les dispositifs entrent en mode faible puissance pour économiser l'énergie. Dans le mode non-beacon enabled, il n'y a pas de structure en supertrame, i.e. les nœuds sont toujours à l'état actif et utilisent l'algorithme Unslotted CSMA/CA pour l'accès au canal et la transmission de données. Dans ce cas, la conservation d'énergie a lieu au niveau des couches supérieures [50].

Les protocoles fondés sur la contention sont robustes et garantissent le passage à l'échelle. En outre, ils ont généralement un délai plus faible que ceux reposant sur TDMA et ils peuvent facilement s'adapter aux conditions de trafic. Malheureusement, leur dissipation d'énergie est plus élevée que celle des protocoles TDMA à cause de la contention et des collisions. Des mécanismes Duty-cycle peuvent contribuer à réduire la surconsommation d'énergie, mais ils doivent être conçus avec soin pour être flexibles et à faible latence.

3. Protocoles MAC hybrides

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (changement du comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. Concernant les réseaux de capteurs sans fil, Z-MAC est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC [36] commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec un

de ses voisins à un saut n'interfère pas avec les transmissions de ses voisins à deux sauts.

EXEMPLES :Z-MAC :

Z-MAC permet à chaque nœud de maintenir son propre ordonnancement qui dépend du nombre de voisins et évite tout conflit avec ses voisins de contention. Chaque nœud a des informations sur les slots de tous ses voisins à deux sauts et tout le monde se synchronise sur un slot de référence. Après cette phase d'initialisation, les nœuds sont prêts pour l'accès au canal. Les nœuds peuvent être soit en mode faible niveau de contention (LCL pour Low Contention Level), soit en mode haut niveau de contention (HCL pour High Contention Level). Un nœud persiste dans le mode LCL sauf s'il a reçu une notification (ECN pour Explicit Contention Notification). Dans le mode HCL, seuls les propriétaires du slot et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à concourir pour l'accès au canal. En LCL (à la fois les propriétaires et les non-propriétaires) peuvent concourir pour transmettre dans n'importe lequel des slots. En revanche les propriétaires ont une priorité sur les autres. De cette façon, Z-MAC peut atteindre un niveau élevé d'utilisation du canal, même en faible contention, car un nœud peut transmettre dès que le canal est disponible. Les protocoles hybrides tentent de combiner les points forts des protocoles MAC fondés sur TDMA et ceux avec contention tout en compensant leurs faiblesses. Toutefois, ces techniques semblent être complexes pour être réalisables dans un déploiement d'un grand nombre de nœuds [36].

– Protocole OPMAC (Optimizing et Parallel MAC Protocol)

OPMAC [9] c'est un protocole MAC conçu pour minimiser l'énergie de consommation En évitant certaines causes de perte d'énergie. Comparé par simulation à des protocoles similaires Tels que S-MAC et T-MAC, notre protocole prolonge la durée de vie du réseau de capteurs.

IL se décompose en succession de phases. Qui peut être exécuté de manière cyclique ou périodique. Ces phases sont : Élection du leader, mise à jour matricielle des voisins, réservation, optimisation, transmission et dormir. Plusieurs façons dont

OPMAC évite certaines causes de perte d'énergie. Ces façons sont : Éviter l'écoute, Éviter les transitions dormir/activité, éviter la liste de repos, Éviter les collisions, Éviter l'émission.

3.5 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière, quant à elle, dépend essentiellement de la consommation d'énergie du nœud. Nous avons présenté dans ce chapitre quelques approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Le premier axe des techniques de conservation d'énergie vise à réduire le duty-cycle des nœuds. Cela se traduit par la réduction de la durée de l'activité radio afin d'éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont vu le jour soit sous forme de protocoles MAC à faible duty-cycle ou bien sous forme de protocoles indépendants de niveau supérieur fondés sur des ordonnancements sleep/wakeup. Le second axe s'intéresse à l'acquisition des données. En effet, un point intéressant est que plusieurs solutions protocolaires proposées dans la littérature supposent que la consommation d'énergie de la radio est plus élevée que celle due à l'échantillonnage ou au traitement de données.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter notre solution pour la minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs.

Approche de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs basée sur l'optimisation des graphes

4.1 Introduction

Comme les nœuds capteurs sont des composants micro-électroniques, il 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. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. Les solutions proposées dans la littérature et qui se focalisent sur la question d'énergie dans les réseaux de capteurs sont multiples. Dans notre travail nous nous sommes intréssés à la notion des points d'articulation utilisée dans la théorie des graphes pour préserver l'énergie des nœuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter le modèle du réseau dans lequel notre solution est opérationnelle, ensuite nous détaillons notre proposition et analysons les résultats de simulation.

4.2 Modèle du réseau

Le réseau considéré est composé d'un nombre de nœuds capteurs déployés aléatoirement dans une zone de capture, et une station de base qui recevra les données capturées pour les acheminer en suite à l'utilisateur final. Figure 4.1 [1]

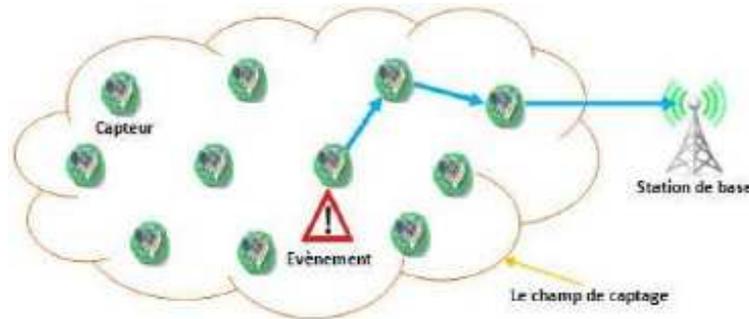


FIGURE 4.1 – Modèle du réseau

4.3 Solution proposée

Nous rappelons que notre but est la minimisation de l'énergie des nœuds capteurs pour prolonger la durée de vie du réseau. Pour cela, nous avons proposé une solution qui se base sur la notion des points d'articulation utilisée dans la théorie des graphes. Dans un premier temps, nous allons présenter cette notion, ensuite les hypothèses sous lesquelles notre solution est fonctionnelle, et enfin nous détaillons notre proposition.

4.3.1 Notions préliminaire des points d'articulation

Nous présentons quelques définitions sur les graphes.

- **Graphes et sous-graphes connexes**
 - **Définition 1** : Un graphe non orienté connexe si chaque sommet est accessible à partir de n'importe quel autre. Autrement dit, si pour tout couple

de sommets distincts $(s_i, s_j) \in S^2$, il existe une chaîne entre s_i et s_j .

Exemple : Par exemple, le graphe non orienté suivant. Figure 4.2 [2] :

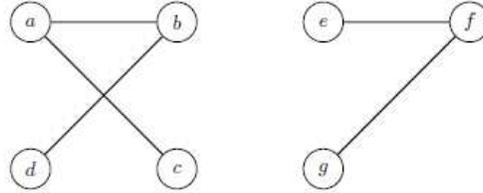


FIGURE 4.2 – Graphe non connexe

n'est pas connexe car il n'existe pas de chaîne entre les sommets a et e . En revanche, le sous-graphe induit par les sommets a, b, c, d est connexe.

- **Définition 2 :** Une composante connexe d'un graphe non-orienté G est un sous-graphe G' de G qui est connexe et maximal (c'est-à-dire qu'aucun autre sous-graphe connexe de G ne contient G').

Un graphe est dit connexe si et seulement si il admet une unique composante connexe.

Par exemple, le graphe précédent est composé de 2 composantes connexes : la première est le sous-graphe induit par les sommets a, b, c, d , et la seconde est le sous-graphe induit par les sommets e, f, g .

- **Définition 3 :** Un point d'articulation d'un graphe est un sommet dont la suppression augmente le nombre de composantes connexes [44].
 - Un isthme est une arête dont la suppression a le même effet.
 - Un ensemble d'articulation $E \in S$ d'un graphe connexe $G = (S, A)$ est un ensemble de sommets tel que le sous-graphe G' déduit de G par suppression des sommets de E ne soit plus connexe [2].

4.3.2 Hypothèses

Nous supposons que le déploiement des nœuds capteurs dans notre réseau est aléatoire et nous considérons que les nœuds capteurs sont homogènes, i.e, ils ont initialement les mêmes capacités énergétiques, de calcul et de stockage. Nous supposons aussi que le graphe représentant notre réseau est initialement connexe.

4.3.3 Détail de solution proposée

L'objectif de la solution proposée est la minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs, afin de prolonger la vie des nœuds et rendre le réseau opérationnel le plus long temps possible. Pour mettre en place notre solution, nous nous sommes basés sur la notion des points d'articulation utilisée dans la théorie des graphes. L'idée consiste à modéliser le réseau par un graphe et chercher les points d'articulation sur le graphe pour obtenir un graphe optimal, i.e, un graphe qui contient uniquement les nœuds indispensables représentés par les points d'articulation. Nous rappelons qu'un point d'articulation est un sommet d'un graphe non orienté qui, si on le retire du graphe, augmente le nombre de composantes connexes. Autrement dit, le retrait d'un point d'articulation rendra le graphe non connexe. Les autres nœuds éliminés (appelés nœuds redondants ou des nœuds qui ne sont pas des points d'articulation) sont mis en veille. De cette façon, l'énergie globale du réseau sera minimisée et conservée. Bien évidemment et suite à plusieurs opérations de transmission et de réception, un ou plusieurs nœuds épuisent leur énergie causant ainsi le partitionnement du réseau, i.e., le graphe devient non connexe. En ce moment, nous réveillons les nœuds mis en veille (i.e., les nœuds redondants) et nous réexécutons de nouveau l'algorithme de recherche des points d'articulation le graphe obtenu. Ce processus est réitéré tant que il y a des nœuds redondants dans le réseau. La figure 4.3 illustre le schéma de la solution proposée.

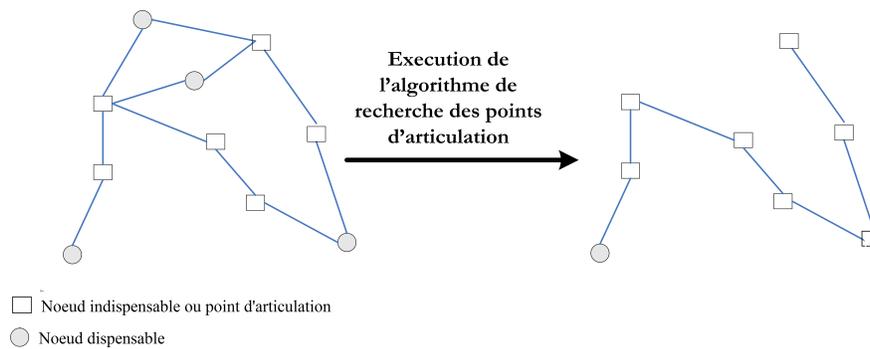


FIGURE 4.3 – Schéma de la solution proposée

Le pseudo algorithme suivant illustre les différentes étapes suivies dans la solution proposée.

1. Le réseau original est représenté par un graphe connexe G .
2. Exécution de l'algorithme de recherche des points d'articulation sur le graphe G , le résultat est un graphe connexe G' .
3. Tant que le réseau, représenté par le graphe G' , n'est pas partitionné alors il faut continuer à l'utiliser.
4. Tant que il y a des nœuds redondants, il faut les réveiller et aller à 2.

• Recherche de point d'articulation

Soit G un graphe à n sommets et m arêtes. Un algorithme trivial de complexité d'ordre $O(nm)$ est le suivant :

a = nombre de composantes connexes de G (déterminé à l'aide de l'algorithme de parcours en profondeur ou de l'algorithme de parcours en largeur).

pour chaque sommet v de V ayant des arêtes incidentes retirer v de V

b = nombre de composantes connexes de G une fois v éliminé si $b > a$

v est un point d'articulation de G remettre en place v .

- **Algorithme de parcours en profondeur :**

```
explorer (graphe G, sommet s)
marquer le sommet s
pour tout sommet t voisin du sommet s
si t n'est pas marqué alors
explorer (G, t);
```

L'algorithme de parcours en profondeur (ou DFS, pour Depth First Search) est un algorithme de parcours d'arbre, et plus généralement de parcours de graphe, qui se décrit naturellement de manière récursive. Son application la plus simple consiste à déterminer s'il existe un chemin d'un sommet à un autre.

- **Algorithme de parcours en largeur :**

```
parcoursLargeur (Graphe G, Sommet s)
f = CreerFile ();
f.enfiler (s);
marquer (s);
tant que la file est non vide
s = f.defiler ();
afficher (s);
pour tout voisin t de s dans G
si t non marqué
f.enfiler (t);
marquer (t);
```

L'algorithme de parcours en largeur permet de calculer les distances de tous les nœuds depuis un nœud source dans un graphe non pondéré (orienté

ou non orienté). Il peut aussi servir à déterminer si un graphe non orienté est connexe.

4.4 Simulation

Pour valider notre proposition, nous avons effectué une série de simulation avec JAVA. Dans ce qui suit, nous allons énumérer les paramètres de simulation et citer les différentes métriques mesurées, ensuite, nous allons analyser et discuter les résultats de simulation.

4.4.1 Paramètres de simulation

le Tableau 4.1 regroupe les différents paramètres utilisés dans la simulation.

Paramètre de simulation	Valeurs
Surface	100*100 (m^2)
Nombre de nœuds	130
Energie initiale	0.5 (joules)
Energie d'émission	50*0.000000001(watt)
Energie de réception	50*0.000000001(watt)
Temps de simulation	1000(Minute)
Portée de capteurs	20(Mètres)

TABLE 4.1 – Tableau des paramètres de simulation

4.4.2 Métriques de simulation

Afin de montrer l'efficacité de notre solution, nous avons considéré les métriques suivantes :

1. Energie moyenne restante : représente la quantité d'énergie consommée par l'ensemble des nœuds dans le réseau. Cette métrique est mesurée dans le cas normal sans solution et dans le cas d'utilisation de la solution.
2. Durée de vie : représente la durée de vie du réseau. Cette métrique est mesurée dans le cas normal sans solution et dans le cas où la solution est utilisée.

4.4.3 Résultats de la simulation

4.4.3.1 L'énergie moyenne restante

La figure 4.4 représente l'énergie restante dans le réseau telle qu'elle est mesurée durant la période de la simulation, et ceci dans les deux cas de l'utilisation et sans l'utilisation de la solution proposée. Nous constatons que cette énergie est plus significative dans le cas de notre solution que dans le cas sans solution. En d'autre terme, l'énergie restante dans le cas ou notre solution est utilisée est plus importante que celle dans le cas sans l'utilisation de la solution. Ceci signifie que la solution proposée prolonge davantage la durée du vie du réseau.

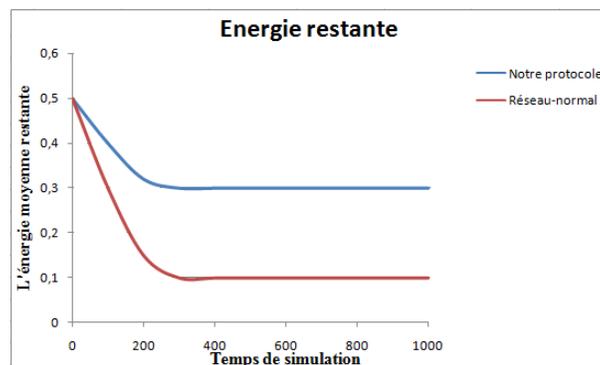


FIGURE 4.4 – L'énergie moyenne restante

4.4.3.2 La durée de vie du réseau

La figure 4.5 représente la durée du vie du réseau (en terme de nombre de nœuds morts) tel qu'elle est mesurée durant la période de la simulation. Nous constatons que le nombre de nœuds morts dans le cas d'utilisation de notre solution est bien

petit que le nombre de nœuds mort dans le cas sans solution. Cela signifie que la solution proposée prolonge davantage la durée de vie du réseau et rend, en conséquence le réseau opérationnel le plus longtemps possible.

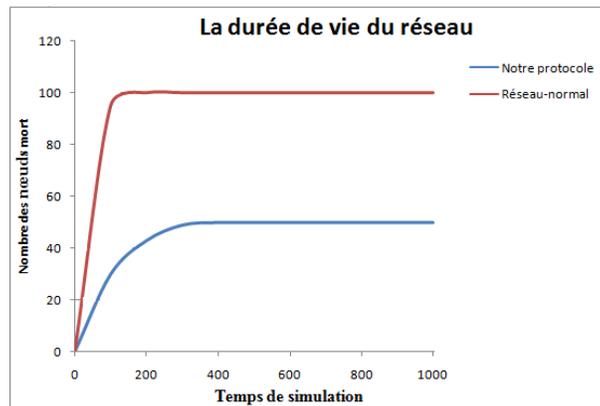


FIGURE 4.5 – La durée de vie du réseau

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une solution pour minimiser la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs. Il s'agit d'une application qui se base sur la recherche des points d'articulation dans un graphe. L'idée consiste à déterminer les points d'articulations qui représentent les nœuds qui sont indispensables pour garder la connexité du graphe. En d'autre termes, le réseau qui assure la communication est composé de nœuds qui sont des points d'articulations. Les résultats de simulation ont montré que notre solution est efficace en terme de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

Conclusion et perspectives

Un réseau de capteurs est un ensemble de nœuds capteurs déployés dans une zone de captage, pour prélever des mesures physiques, qui sont transmis par la suite à une station de base. Ces capteurs sont déployés généralement dans des zones inaccessibles, ce qui rend difficile le rechargement ou le remplacement des batteries. C'est pour cela que la conservation de l'énergie de ces capteurs constitue un problème de recherche ouvert, malgré le nombre importants de solutions proposées dans la littérature.

Dans notre travail, nous nous sommes focalisés sur la problématique de la conservation de l'énergie dans un réseau de capteurs, et nous avons proposé une solution de minimisation de la consommation de l'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. Notre solution repose sur la notion des points d'articulation utilisés dans la théorie des graphes. L'idée consiste à déterminer les points d'articulation dans un graphe qui sont des nœuds indispensables pour la connexité du graphe. En d'autres termes, dans notre réseau, nous ne gardons que les nœuds qui sont des points d'articulation et les autres nœuds sont mis en veille pour sauvegarder l'énergie globale du réseau. Les résultats de simulation montrent que notre solution est efficace en terme de conservation d'énergie et prolonge davantage la durée de vie de réseau.

En perspectives, nous envisageons de comparer notre solution avec d'autres solutions de références pour évaluer sa performance et mesurer son efficacité et robustesse. Nous comptons aussi l'améliorer pour préserver davantage l'énergie et ceci par la minimisation des opérations de calcul effectuées dans notre solution.

Bibliographie

- [1] A. Abdesselam and M. Belouatek. Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle. Master's thesis, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen Faculté des Sciences, 2013.
- [2] A. Adàm. *Problem 2. In Theory of Graphs and its Applications*. Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1964.
- [3] R. Adouane. Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Master's thesis, Faculté des sciences exacte, 2013.
- [4] K. Akkaya and M. Younis. "a survey on routing protocols for wireless sensor networks". *Journal of Ad Hoc Networks*, 3(3) :325–349, May 2005.
- [5] I.F. Akyildiz and M-C. Vuran. *Wireless sensor networks. Jhon Wiley Sons*, 2010.
- [6] J.N Al-Karaki and A.E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey. *Magazine : IEEE Communications*, 11(6) :6–28, December 2004.
- [7] M. Di Francesco A. Passarella G. Anastasi and M. Conti. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Engineering, University of Pisa, Italy*, pages 541–542, 2009.
- [8] T. Armstrong. Wake-up based power management in multi-hop wireless networks. *Term Survey Paper*, 2005.

- [9] A. Baadache and R. Adouane. Minimizing the energy consumption in wireless sensor networks. *Ad hoc Wireless Sensor Networks (AHSWN)*, 27(3-4) :223–237, 2015.
- [10] K. BEYDOUN. "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs". PhD thesis, U.F.R des Sciences et Techniques de l'université de Franche-Comté, Décembre 2009.
- [11] M. Bouallegue. *Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université du Maine, 2016.
- [12] G. Chalhoub. "les reseaux de capteurs sans fil". *Workshop Réseaux et Télécommunication de l'IUT*, 2010.
- [13] Y. Challal. Réseaux de capteurs sans fils. *Centre national de la recherche scientifique Comptegne*, Novembre 2008.
- [14] R.Govindan C.Intanagonwiwat and D.Estrin. Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proceedings of the ACM Mobi Com '00, Boston, MA*, pages 56–67, 2000.
- [15] C-N. Coelho D-C. Silva, M-A-M. Viera and J-M. Mata. Survey on wireless sensor network devices. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 537–544, 2003.
- [16] J. Polastre D. Culler and J. Hill. Versatile low power media access for wireless sensor networks. *In : Proc, Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 04)*, pages 3–5, November 2004.
- [17] D. Culler D. Estrin and M. Srivastara. Overview of sensor networks. *IEEE Computer*, 37 :41–49, 2004.
- [18] C Schurgers D.Mirza and M. Owrang. Energy-efficient wakeup scheduling for maximizing lifetime of ieee 802.105.4 networks. *In Proceedings International Conference on Wireless Internet (WICON 05), Budapest, Hungary*, pages 130–137, July 2005.
- [19] C. Duran-Faundez. *Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Juin 2009.

- [20] Jaap C. Haartsen. The bluetooth radio system. *IEEE Personal Communications*, 7(1) :28–36, February 2000.
- [21] K. Heurtefeux. *PROTOCOLES LOCALISÉS POUR RÉSEAUX DE CAPTEURS*. PhD thesis, Ecole doctorale : Informatique et Mathématiques de Lyon, Septembre 2009.
- [22] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. "a survey on sensor networks". *IEEE Communications Magazine*, 40 :102–114, 2002.
- [23] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, August 2002.
- [24] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. *Computer Networks :The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 38(4) :393–422, Mars 2002.
- [25] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook Of Sensor Networks : Compact Wireless And Wired Sensing Systems*. CRC press, 2005.
- [26] S. Jain. Energy aware communication in ad-hoc networks. *Technical Report UWCSE*, June 2003.
- [27] R. Jurdak. Wireless ad hoc and sensor networks : A cross-layer design perspective. *University College Dublin*, 2007.
- [28] R. Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Toulouse, France, Septembre 2009.
- [29] H. Karl and A-E. Willing. A short survey of wireless sensor networks. *Technical Reports*, 2003.
- [30] B. Kechar. *Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université d'Oran faculté des sciences, 2010.
- [31] L. Khelladi and N. Badache. Les réseaux de capteurs : état de l'art. *Rapport de recherche, faculté des électronique et informatique Bab Ezzouar-Algérie*, Février 2004.
- [32] V-S. Raghavan S. Kumar and J. Deng. Medium acces control protocols for ad_{hoc}wirelessnetworks : A survey. *Elsevier Ad – Hoc Networks Journal*, 4 : 326 – –358, 2006.

- [33] K. Arisha M. Younis and M. Youssef. Energy-aware tdma-based mac for sensor networks. *In Proceedings of the IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT 2002), New York City, USA, May 2002.*
- [34] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. “teen : A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”. *1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.*
- [35] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. Apteem : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. *Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium IEEE, 2002.*
- [36] M. Aia J. Min, I. Rhee, and M-L. Sichitiu. Z-mac : a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16 :511–524, 2008.
- [37] M. Lehsaini. *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique.* PhD thesis, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l’Ingénieur et l’université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques, 2009.
- [38] S. Moad. Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Master’s thesis, Université IFSIC-Rennes 1, 2008.
- [39] D. Niculescu. Topics in ad-hoc networks : communication paradigms for sensor networks. *NEC Laboratories America, IEEE Communications Magazine*, Mars 2005.
- [40] S. Dulman P. Havinga-L-V. Hoesel T. Nieberg and J. Wu. ”collaborative algorithms for communication in wireless sensor networks”. *Ambient Intelligence : Impact on Embedded Systems, Kluwer Academic Publishers*, Octobre 2003.
- [41] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, May 2000.
- [42] Inc. ZigBee Practel. “technology for wireless sensor networks”. April 2006.
- [43] Jennifer C. Hou R. Zheng and L. Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks. *In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking and computing (MobiHoc 03), New York, NY, USA, ACM, pages 35–45, 2003.*

- [44] M. Rigo. Théorie des graphes, deuxième bacheliers en sciences mathématiques. 2010.
- [45] C. Schurgers S. Park, V. Raghuthan and M-B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19 :40–50, 2002.
- [46] C. Saad. *Quelques contributions dans les réseaux de capteurs*. PhD thesis, Université d’Avignon et Des Pays de Vaucluse, 2008.
- [47] S. Rath B-P-S. Sahoo and D. Puthal. Energy efficient protocols for wireless sensor networks : A survey and approach. *International Journal of Computer Application*, 44 :43–48, 2012.
- [48] P. Santi. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *Hard-cover*, July 2005.
- [49] V. Tsiatsis C. Schurgers and Mani B. Srivastava. Stem : Topology management for energy efficient sensor networks. *In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 3 :78–89, 2002.
- [50] IEEE standard for information technology Part 15.4. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy). *low rate wireles personal area networks(LR-WPANs)*, 2003.
- [51] P. Minet A. Laouiti A. Plakoo M. Badel P. Muhlethaler P. Jacquet J. Lecomte T. Plesse, C. Adjih. Olsr performance measurement in a military mobile ad-hoc network. *Special issue on data communication and topology control in ad-hoc networks*, 3 :575–588, September 2005.
- [52] Y. Zhu M. Millard S. Fung N. Gura H. Eberle S. C. Shantz V. Gupta, M. Wurm. Sizzle : A standards-based end-to-end security architecture for the embedded internet pervasive and mobile computing 1. *Elsevier*, pages 425–445, August 2005.
- [53] K. Obraczka V. Rajendran and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. *In Proceedings ACM SesSys 2003*, November 2003.
- [54] A.Chandrakasan W.Heinzelman and H.Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks. *International conference on parallel processing*, pages 156–163, 2001.

-
- [55] W. Su Y. Sankarasubramaniam I-F. Akyildiz and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40 :102–114, 2002.
- [56] J. Heidemann Y. Xu and D. Estrin. “geography-informed energy conservation for ad hoc routing”. In *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM’01), Rome, Italy*, pages 70–84, July 2001.
- [57] D. Estrin Y. Yu and R. Govindan. Geographical and energy-aware routing : A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. *UCLA Computer Science Department Technical Report*, May 2001.
- [58] Y. Yaser. *Routage pour la gestion de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Universite de Haute Alsace Faculté des Sciences et Techniques, 2011.
- [59] D. Estrin W. Ye and J. Heidemann. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12 :493–506, 2004.
- [60] Y. Younes. Minisisation d’énergie dans un réseau de capteurs sans fil. Master’s thesis, Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, 2012.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous avons proposé une solution pour minimiser la consommation de l'énergie dans un réseau de capteur afin de prolonger la durée de vie de notre réseau. L'idée de la solution repose sur la notion de points d'articulation dans un graphe. A partir du graphe initial qui modélise la communication dans le réseau, nous déterminons les points d'articulation et nous ne gardons dans le graphe que les nœuds qui sont des points d'articulation. Les autres nœuds sont mis en veille pour sauvegarder l'énergie globale du réseau. Les résultats de simulation ont bien montré l'efficacité de notre solution en terme d'énergie restante et durée de vie.

Mots clés : Réseau de capteur sans fil, Durée de vie , points d'articulation, nœuds en veille.

ABSTRACT

In this work, we proposed a solution to minimize the consumption of energy in a sensor network in order to extend the lifetime of our network. The idea of the solution is based on the idea of points of articulation in a graph. From the initial graph that models the communication in the network, We determine the points of articulation and we keep in the graph only the nodes which are points of articulation. The other nodes are put in standby to save the overall power of the network. The simulation results clearly showed the efficiency of our solution in terms of energy and lifetime.

Key words : Wireless Sensor network, Lifetime, Point of articulation, Nodes in standby.