



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

**Faculté d'Electronique et d'Informatique
Département Informatique**

Mémoire de Licence

Filière : Informatique

**Spécialité :Ingénierie des Systèmes d'Information
et des Logiciels**

Thème:

**La conservation d'énergie en utilisant le Duty Cycling et Power
Control dans les systèmes IoT**

Sujet Proposé et encadré par:

Mme B.Zebbane

Présenté par :

AOUABED Samy Aghiles

BESSAI Zoheir

Devant le jury composé de :

Binôme N° : 059/ 2021

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant pour la force et la volonté qui nous a permis d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement et exprimons notre sincère gratitude à notre promotrice **Mme B.ZEBBANE** pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils mais aussi sa bienveillance.

Nous remercions aussi les membres du jury qui nous font l'honneur d'examiner notre modeste travail.

Enfin, nous tenons aussi à remercier nos parents ainsi que nos amis pour leurs soutient sans faille ainsi que leurs patience et leurs encouragement.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Généralités sur internet des objets et réseaux de capteurs | 8 |
| 1.1 | Introduction | 8 |
| 1.2 | Internet des Objets | 8 |
| 1.2.1 | Définition | 8 |
| 1.2.2 | Caractéristiques | 8 |
| 1.2.3 | Architecture de l'IOT | 9 |
| 1.3 | Réseau de capteurs sans-fil | 10 |
| 1.3.1 | Historique et définition | 10 |
| 1.3.2 | Capteurs | 11 |
| 1.3.3 | Architecture d'un capteur | 12 |
| 1.3.4 | Types de réseaux de capteurs | 13 |
| 1.3.5 | Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil | 13 |
| 1.3.6 | Topologies et organisation dans les RCSF | 14 |
| 1.3.7 | Domaines d'application des réseaux de capteurs | 15 |
| 1.3.8 | Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSFs | 15 |
| 1.4 | Conclusion | 16 |
| 2 | Techniques de conservation d'énergie | 17 |
| 2.1 | Introduction | 17 |
| 2.2 | Définitions | 17 |
| 2.2.1 | Durée de vie d'un réseau de capteurs | 17 |
| 2.2.2 | Couverture | 17 |
| 2.2.3 | Degré de couverture | 17 |
| 2.2.4 | Connectivité | 18 |
| 2.2.5 | Degré de connectivité | 18 |
| 2.3 | Source de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs | 18 |
| 2.3.1 | Énergie de capture | 18 |
| 2.3.2 | Énergie de traitement | 18 |
| 2.3.3 | Énergie de communication | 18 |
| 2.4 | Sources de surconsommation d'énergie | 18 |
| 2.4.1 | Les collisions | 19 |
| 2.4.2 | L'écoute abusive (Overhearing) | 19 |
| 2.4.3 | L'écoute à vide (Idle listening) | 19 |
| 2.4.4 | Paquets de contrôle (Overhead) | 19 |
| 2.4.5 | Non disponibilité du récepteur (overmitting) | 19 |
| 2.5 | Techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs | 19 |
| 2.5.1 | Routage économique en énergie | 20 |
| 2.5.2 | Agrégation de données | 20 |
| 2.5.3 | Technique de mobilité | 21 |
| 2.5.4 | Contrôle de topologie | 21 |
| 2.5.5 | Conclusion | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | PROTOCOLE DE CONTRÔLE DE TOPOLOGIE | 25 |
| 3.1 | Introduction | 25 |
| 3.2 | Protocoles basés Duty Cycling | 25 |
| 3.2.1 | GAF : Geographic Adaptive Fidelity | 25 |
| 3.2.2 | ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies | 27 |
| 3.2.3 | SPAN | 28 |
| 3.2.4 | CPA : Connectivity based Partitioning Approach | 29 |
| 3.2.5 | GECP : Groupe based Energy-Conserving Protocol | 30 |
| 3.2.6 | Discussion | 32 |
| 3.3 | Protocole Power Control | 32 |
| 3.3.1 | LMST : Local Minimum Spanning Tree | 33 |
| 3.3.2 | EDTC : Energy-aware Dynamic Topology Control algorithm | 34 |
| 3.3.3 | Discussions et comparaison | 35 |
| 3.4 | Conclusion | 36 |
| 4 | Conception | 37 |
| 4.1 | Introduction | 37 |
| 4.2 | Idée de base et fonctionnement | 37 |
| 4.3 | Modélisation du protocole GECP | 37 |
| 4.3.1 | Phase de formation de la liste équivalente | 37 |
| 4.3.2 | Phase du choix des nœuds actifs | 38 |
| 4.4 | Modélisation du protocole LMST | 41 |
| 4.4.1 | Phase de création du graphe réduit | 41 |
| 4.4.2 | Phase d'Ajustement de la puissance de transmission | 41 |
| 4.5 | Modélisation du protocole de la combinaison GECP/LMST | 42 |
| 4.6 | Conclusion | 43 |
| 5 | Implémentation et Résultat des simulations | 44 |
| 5.1 | Introduction | 44 |
| 5.2 | Environnement de développement | 44 |
| 5.3 | Paramètre de simulation | 45 |
| 5.4 | Interface Graphique | 45 |
| 5.5 | Résultats de simulation | 46 |
| 5.5.1 | Résultat du Duty Cycling | 46 |
| 5.5.2 | Résultat du Power Control | 49 |
| 5.5.3 | Résultat de la combinaison Duty Cycling/Power Control | 52 |
| 5.6 | Conclusion | 52 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | L'Architecture de l'IOT[48]. | 9 |
| 1.2 | Représentation d'un réseau de capteurs sans fil[5]. | 11 |
| 1.3 | Schéma de fonctionnement d'un capteur logique.[6] | 11 |
| 1.4 | Schéma de fonctionnement d'un capteur analogique.[6] | 11 |
| 1.5 | Schéma de fonctionnement d'un capteur numérique.[6] | 12 |
| 1.6 | Les composants d'un nœud capteur.[38] | 12 |
| 1.7 | Topologie plate.[52] | 14 |
| 1.8 | Architecture hiérarchisée.[24] | 15 |
| 2.1 | Techniques de conservation d'énergie. | 20 |
| 2.2 | Envoie de données sans agrégation. | 21 |
| 2.3 | Envoie de données avec agrégation. | 21 |
| 2.4 | Techniques de contrôle de topologie. | 22 |
| 2.5 | Exemple de Duty Cycling. | 22 |
| 2.6 | Cycle de Sleep/Awaked'un capteur[45]. | 23 |
| 2.7 | Exemple de Power Control. | 23 |
| 3.1 | Diagramme d'état de transition du protocole GAF. | 26 |
| 3.2 | Diagramme d'état de transition du protocole ASCENT. | 27 |
| 3.3 | Diagramme d'état de transition du protocole SPAN. | 29 |
| 3.4 | Diagramme d'état de transition du protocole CPA. | 30 |
| 4.1 | Diagramme d'activité décrivant la formation de la liste équivalente. | 38 |
| 4.2 | Diagramme d'activité décrivant l'état découverte. | 39 |
| 4.3 | Diagramme d'activité décrivant l'état actif. | 40 |
| 4.4 | Diagramme d'activité décrivant l'état sommeil. | 41 |
| 4.5 | Diagramme d'activité décrivant le protocole LMST. | 42 |
| 4.6 | Diagramme d'activité décrivant le fonctionnement de la combinaison GECP/LMST. | 42 |
| 5.1 | Fenêtre d'accueil de l'application. | 45 |
| 5.2 | Interface principale de l'application. | 46 |
| 5.3 | Comparaison entre les deux topologie pour 50 nœuds à $T = 1200s$ | 46 |
| 5.4 | Nombre de nœuds en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 5000s$ | 47 |
| 5.5 | Taux d'énergie restant en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 5000s$ | 47 |
| 5.6 | Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 100s$ | 48 |
| 5.7 | Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 300s$ | 48 |
| 5.8 | comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 5000s$ | 49 |
| 5.9 | comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds. | 49 |
| 5.10 | Nombre de nœuds en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds $T = 6000s$ | 50 |
| 5.11 | Taux d'énergie restant en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 6000s$ | 50 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.12 | Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 300s$ | 51 |
| 5.13 | Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 3500s$ | 51 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Avantages et Inconvénients des protocoles Duty-Cycling. | 32 |
| 3.2 | Avantages et Inconvénients des protocoles de Power Control. | 36 |

Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont une technologie qui est utilisée dans plusieurs domaines d'application. Un RCSF est composé d'un grand nombre de capteurs qui sont des petites cellules de capture et traitement d'information qui une fois réunis, composent un réseau qui est autonome dans son fonctionnement. Ces capteurs sont des dispositifs de taille réduite avec des ressources limitées, de ce fait les RCSF se heurtent à plusieurs contraintes. En effet, du fait de leurs déploiement dans des environnements hostiles, les capteurs qui composent le réseau sont très souvent difficilement accessibles voir pas du tout, ce qui crée un certain nombre de contraintes et problématiques qui doivent être prises en compte lors de la conception d'un RCSF. L'une des contraintes les plus problématiques est la contrainte énergétique. Les capteurs fonctionnent sur batterie, et ces batteries ont une quantité d'énergie limitée. De ce fait, l'un des défis que rencontre les RCSF est la conservation d'énergie.

La durée de vie d'un réseau peut être amélioré en utilisant différentes techniques qui minimisent la consommation d'énergie, parmi elles on trouve le contrôle de topologie. Le contrôle de topologie se divise en deux catégories :

-Le duty Cycling : Il consiste à activer un sous ensemble de nœuds et de mettre les autres en état "Sleep" en appliquant un scheduling pour changer les nœuds actifs périodiquement.

-Le Power Control : Il consiste à réduire la puissance de transmission des nœuds pour prolonger la durée de vie du réseau en éliminant les liens redondants.

Dans ce projet, nous allons nous intéresser à ces deux approches, notre objectif est de proposer une solution qui combine ces deux approches afin de mettre en place une solution plus économe en énergie.

Ce mémoire est divisé en 5 chapitres :

- Le premier chapitre se concentrera sur les différentes définitions et notions qui concernent les RCSF ainsi que des différentes contraintes qui doivent être prises en compte lors de leurs conceptions .
- Dans le deuxième chapitre, nous discuterons les techniques utilisées pour conserver l'énergie d'un réseau de capteurs
- Dans le troisième chapitre, nous allons présenter quelques protocoles de contrôle de topologie.
- Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter la conception de la solution qu'on propose.
- Enfin, le dernier chapitre sera consacré à l'implémentation, aux résultats obtenus ainsi que la comparaison entre les différentes solutions.

Chapitre 1

Généralités sur internet des objets et réseaux de capteurs

1.1 Introduction

Grâce au progrès et les avancements technologiques durant ces dernières années, les systèmes électroniques se sont démocratisés dans les appareils dit connectés un peu partout et ceci dans tous les domaines. Parmi, les nombreuses utilisations des technologies des objets connectés, nous pouvons citer l'utilisation de capteurs connectés afin de faciliter l'exécution d'une tâche. Ces réseaux, appelés RCSF qui sont utilisés dans plusieurs domaines et suscitent un très grand engouement chez les chercheurs du fait de leurs faible cout de mise en place, et de leurs efficacités.

Dans ce chapitre, nous définirions ce qu'est un nœud capteur, l'unité individuelle qui compose un réseau, son architecture et ces types. Ensuite, nous aborderons les RCSF, leurs fonctionnements, leur domaines d'application, leurs caractéristiques, leur types, ainsi que les contraintes qui doivent être considérées lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil.

1.2 Internet des Objets

1.2.1 Définition

Le terme "IOT", sigle utilisé pour parler d'internet des objets (Internet of things) est apparu en 1999, il fut pour la première fois utilisé par 'Kevin ASHTON', un ingénieur britannique co-fondateur de l'Auto-ID Center au [1][2][3][4], il fait référence à un écosystème d'objets physique inter-connectés via internet capables d'échanger des données diverses entre différents appareils et capteurs de manière automatisés[44]. Parmi ces écosystèmes connectés, on trouve les réseaux de capteurs sans fil aussi appelés les RCSFs qui sont utilisés dans différents domaines afin de capter, traiter et transmettre différentes informations et données critiques en temps réel.

1.2.2 Caractéristiques

Un système IOT se caractérise par[48] :

Interconnectivité : L'IOT permet d'interconnecter tout les objets connectés avec l'infrastructure de communication mondial.

Connectivité : La connectivité permet l'accessibilité et la compatibilité du réseau. L'accessibilité est le fait d'accéder à un réseau, alors que la compatibilité est la possibilité de produire et de consommer des données.

Services lié aux objets : L'IOT est capable de fournir des services liés aux objets dans la limite des objets, tels que la protection de la vie privée et la cohérence sémantique entre les objets physiques et les objets virtuels associés

Hétérogénéité : Les appareils IOT sont hétérogènes car basés sur différentes plates-formes matérielles et réseaux, ils peuvent interagir avec d'autres appareils et plates-formes via différents réseaux.

Changements dynamiques : L'état des appareils change dynamiquement, par exemple, veille et allumage, connecté et/ou déconnecté tout comme le contexte de l'appareil, y compris la vitesse et la localisation. De plus, le nombre d'appareils peut lui aussi changer dynamiquement.

La grande échelle : Le nombre d'appareils qui devront être gérés et qui devront communiquer entre eux sera au moins d'un ordre de grandeur supérieur au nombre d'appareils connectés à Internet aujourd'hui. Aussi, ceci crée un besoin de gérer la quantité de données générées ainsi que le traitement de ces dernières.

Sécurité : Au-delà des profits que permet l'IOT, l'aspect sécurité ne doit pas être négligé par les bénéficiaires et les créateurs de l'IOT. En effet, les appareils et les systèmes doivent être sécurisés que ce soit au niveau des données personnels mais aussi des données qui transitent par ces derniers.

1.2.3 Architecture de l'IOT

L'architecture IOT consiste en plusieurs couches technologiques qui supportent la technologie IOT. Elle sert à illustrer la manière dont différentes technologies sont reliées. La figure 1.1 montre la structure l'architecture de l'IOT.

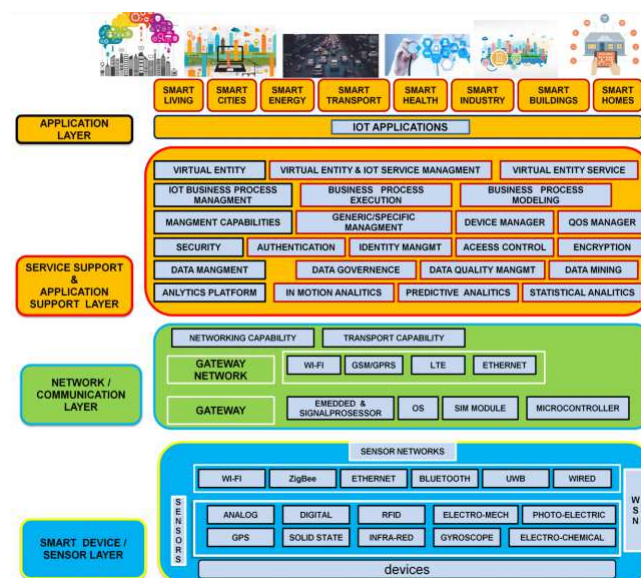


FIGURE 1.1 – L'Architecture de l'IOT[48].

Couche des dispositifs intelligent/capteurs

La couche la plus basse est constituée d'objets intelligents intégrés à des capteurs. Les capteurs permettent l'interconnexion des mondes physique et numérique, ce qui permet à des informations en temps réel d'être collectées et traitées. Il existe différents types de capteurs pour

différents usages. Ils ont la capacité de prendre différentes mesures telles que la température, la qualité de l'air, la vitesse, l'humidité, la pression, le débit, le mouvement, . . . etc. Dans certains cas, ils peuvent aussi posséder une mémoire, ce qui leurs permet de sauvegarder certaines mesures. Un capteur mesure des propriétés physiques et les convertit en un signal qui peut être traité par un instrument. Les capteurs utilisent plusieurs protocoles de connexion, parmi eux on peut citer l'Ethernet, le WIFI, le Bluetooth, ou même la GSM et LTE entre autre.

Couche Passerelles et Réseaux

Un volume massif de données sera produit par ces petits capteurs, et ceci requière une infrastructure de transport câblée ou sans fil robuste. Les réseaux actuels, généralement liés à différents protocoles sont utilisés pour prendre en charge les connexions machine à machine (M2M) et leurs applications. Avec la demande requise pour desservir une large gamme de services et d'application IOT tels que les services de transaction à haute vitesse, les applications contextuel, . . . etc, plusieurs réseaux avec différentes technologies et protocoles d'accès sont requises pour assurer un fonctionnement entre elles dans une configuration hétérogène. Ces réseaux peuvent prendre la forme de modèle public, privé ou hybride et sont conçus pour prendre en charge les exigences de communication en matière de latence, de bande passante ainsi que de sécurité.

Couche de service de gestion

Les services de gestion rendent le traitement de l'information possible au travers de l'analyse, du contrôle de sécurité, de la modélisation des processus et de la gestion des appareils. L'une des fonctionnalités les plus importantes de la couche de service de gestion est les moteurs de règle métier et processus. L'IOT apporte des connexions et interactions entre objet et système qui fournissent des informations sous forme de données contextuelles ou événementielles. Certains de ces événements doivent être filtrés ou routés vers des systèmes de post-traitement alors que d'autres doivent être traités dans l'immédiat.

Couche application

Les applications IOT couvrent des environnements/espaces "intelligents" dans des domaines tels que : le transport, le Bâtiment, les villes, le mode de vie, la vente, l'agriculture, les usines, les chaînes d'approvisionnement, le tourisme, l'environnement, l'énergie, . . . etc.

1.3 Réseau de capteurs sans-fil

1.3.1 Historique et définition

Un réseau capteurs sans fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs (appelé capteurs ou nœuds) déployés sur une zone géographique déterminée. Ces derniers sont utilisés afin de superviser des phénomènes spécifiques de telle sorte à ce que chaque capteur du réseau envoie les informations qu'il récolte à un point de collecte (ou plusieurs) aussi appelé passerelle et ce via une connexion sans fil[24]. La figure 1.2 représente un schéma général d'un RCSF. Chaque capteur prélève des données dans son champ de captage et les traite, avant de les faire parvenir à la passerelle soit directement, soit en utilisant d'autres capteurs comme intermédiaires. La passerelle à son tour transmet l'ensemble de ces informations à l'administrateur par la suite.

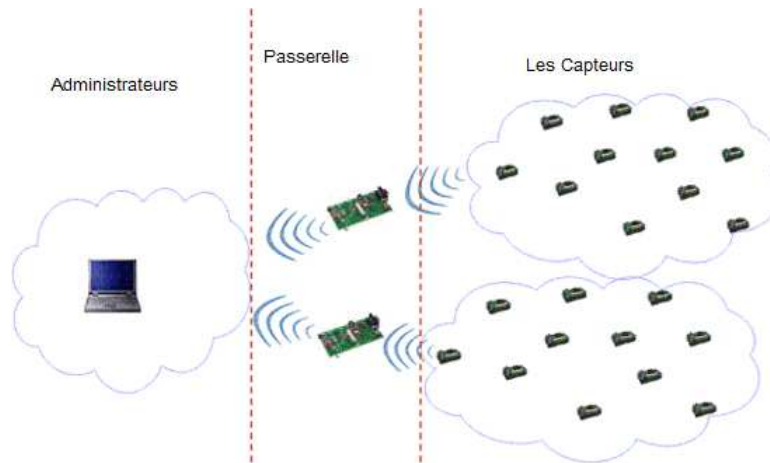


FIGURE 1.2 – Représentation d'un réseau de capteurs sans fil[5].

1.3.2 Capteurs

Un capteur est un dispositif électronique miniaturisé autonome capable de capter un type information spécifique, de traiter cette information et de la transmettre à la passerelle via des moyens sans fil (que ce soit par onde WIFI, Bluetooth ou autres)[23]. Il existe 3 types de capteurs [6] :

Capteur Logique : Aussi appelé capteur tout ou rien (TOR)(Figure 1.3), il prend en entrée une information et donne en sortie un résultat binaire (vrai/faux, oui/non... etc).



FIGURE 1.3 – Schéma de fonctionnement d'un capteur logique.[6]

Capteur Analogique : Il reçoit en entrée une information et la transmet sous forme de signal électrique qui est en relation avec le phénomène détecté (Figure 1.4).

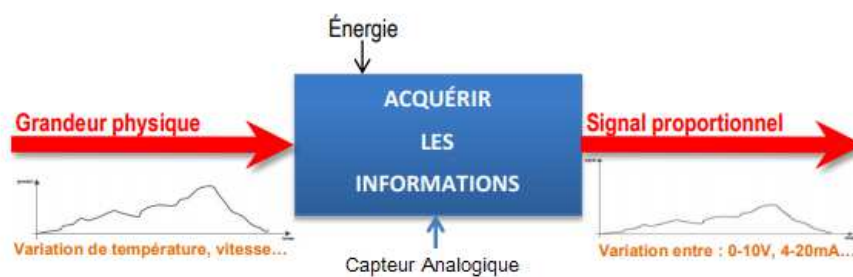


FIGURE 1.4 – Schéma de fonctionnement d'un capteur analogique.[6]

Capteur Numérique : Celui si prend en entrée le phénomène détecté et après traitement de l'information, la transmet sous forme de donnée numérique binaire.



FIGURE 1.5 – Schéma de fonctionnement d'un capteur numérique.[6]

1.3.3 Architecture d'un capteur

On distingue deux type d'architecture[34] :

Architecture Matériel

Un capteur est généralement, composé de quatre unités, l'unité d'acquisition, l'unité de traitement, l'unité de communication et l'unité d'énergie(Figure 1.6).

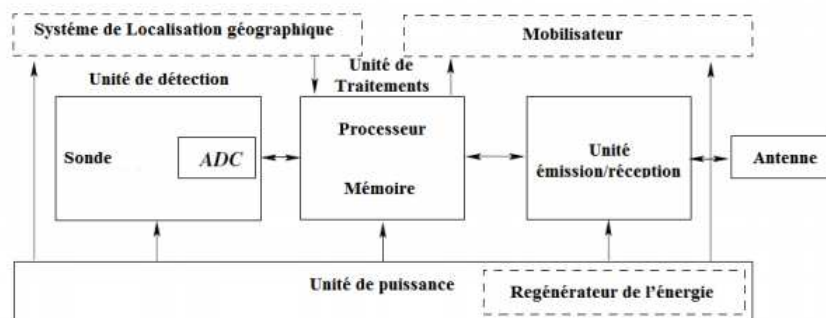


FIGURE 1.6 – Les composants d'un nœud capteur.[38]

Unité d'acquisition (ou de captage) : Le capteur est généralement composé de deux sous-unités : le récepteur (reconnaissant l'analyse) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [26].

Unité de traitement : Le traitement des données est réalisé à l'aide des micro-contrôleurs à faible consommation d'énergie. Ces micro-contrôleurs sont caractérisés par leur fréquence assez faible (de l'ordre de 10 MHz) et d'une mémoire allant jusqu'à 20 ko[36]. L'unité de traitement est liée à l'unité d'acquisition et le module de transmission à l'aide de deux interfaces [59].

Unité de communication : Cette unité de communication est appelée aussi transceiver, elle est composée d'un émetteur/récepteur effectuant l'opération de communication entre capteurs à travers le lien radio. Dans le cas général, pour les liaisons sans fil, l'énergie consommée pour la communication augmente avec la distance.

Unité de contrôle d'énergie : Un micro-capteur est muni d'une ressource énergétique pour alimenter tous ses composants qui se présente généralement sous forme d'une batterie (par exemple pile AA normale d'environ 2.2-2.5 Ah, fonctionnant à 1.5 V). Cependant, en conséquence de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et est généralement irremplaçable. Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules photovoltaïques, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau. Cependant quelques différences existent suivant les fabricants .

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres sous unités ou composants additionnels, dépendant des applications, tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) exigés par les techniques de routage dans le réseau de capteurs et les tâches de captage. Un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un nœud capteur quand on l'exige pour effectuer les tâches assignées.

Architecture Logicielle :

Du fait des ressources limitées dont il dispose un capteur, le système d'exploitation utilisé par ceux-ci est conçu spécialement et ce afin d'optimiser au maximum l'usage des ressources matérielles et énergétiques dont ils disposent. De nombreux systèmes d'exploitation conçus pour des capteurs existent, parmi eux on peut citer :

- TinyOS[37] : Un système d'exploitation open source, il se base dans son fonctionnement sur les événements (fonctionnement événementiel).
 - ContikiOS[7] : Un autre système d'exploitation événementiel, il est plus rapide que le TinyOS mais plus gourmand en énergie.
 - LiteOS[20] : un Système d'exploitation développé par l'entreprise chinoise Huawei.
- On peut aussi citer MantisOS[8] dont le fonctionnement est basé sur le multithreading et AmbientRT qui est basé sur le multi-tâche.

1.3.4 Types de réseaux de capteurs

Les RCSF courants sont déployés sur terre, sous terre et dans l'eau. Suivant l'environnement, un réseau de capteurs fait face à différents défis et contraintes. Il y a cinq types de base de réseaux de capteurs, à savoir :

- Les RCSF terrestres** : déployé sur une zone de manière déterministe ou aléatoire.
- Les RCSF souterrains** : déployé dans des grottes, des mines...etc.
- Les RCSF sous-marins** : déployés sous la surface de l'eau.
- Les RCSF multimédia** : ils sont équipés de caméra et de microphone et doivent assurer un service de qualité en plus de ses autres fonctionnalité.
- Les RCSF mobiles** : ils peuvent se déplacer ainsi que d'interagir avec leurs environnements.

1.3.5 Caractéristiques d'un réseau de capteurs sans fil

• Taille du réseau :

Du fait des conditions d'utilisation des RCSF, le nombre des capteurs utilisés peut atteindre jusqu'à des milliers de capteurs, ce qui permet d'avoir une redondance pour palier à d'éventuel pannes de capteurs[25].

• La topologie dynamique :

Au vu du nombre important de capteurs déployés sur le terrain (aléatoirement ou de manière déterminé), le plus souvent dans des environnements hostiles ou difficile d'accès, la possibilité du réseau à se réorganiser devient une nécessité, et ce afin de palier au éventuelles pannes ou accidents qui pourrait survenir dans le réseau et ce en s'adaptant à la perte de capteurs ou au contraire à l'introduction de nouveau.

- **Modes de communication :**

Il existe plusieurs types de techniques de communication utilisées dans les RCSFs [46] :

-Unicast : Il permet l'échange d'information entre 2 capteurs.

-Broadcast : C'est la méthode utilisée pour transmettre une information de la station de base vers tous les capteurs. Ces informations peuvent être des requêtes, des mises à jours logiciel, ...

-Local Gossip : Ce type de communication est utilisé par les nœud du même cluster afin d'éviter les redondances dans les messages envoyés vers la passerelle. Un cluster est formé suite au groupement des nœuds en utilisant certaines métriques.

-Converge cast : Est utilisé dans les communications utilisées entre un groupe de nœuds et un seul nœud unique, l'avantage de cette méthode est qu'elle est économe en énergie du fait qu'elle diminue le contrôle d'entête des paquets.

-Multicast : Il permet la communication entre un nœud et un groupe de nœuds Il est utilisé dans les protocoles qui incluent le "clustering".

- **Collaboration entre nœud :**

Au vu des contraintes énergétiques auxquelles sont confrontés les RCSFs, la coopération entre les différents capteurs permet d'éviter de traiter la même information et d'envoyer une donnée redondante, et ce afin de minimiser les pertes d'énergie inutile.

1.3.6 Topologies et organisation dans les RCSF

Deux types de topologies peuvent être distinguées : architecture à plat et architecture hiérarchisée.

Architecture à plat

Dans l'architecture à plat (Figure 1.7), les nœuds déployés ont la même fonction. L'information est envoyée directement vers la station de base si cette dernière fait partie de voisinage de la source. Dans le cas contraire, un chemin multi-sauts est réalisé pour acheminer les données. L'avantage le plus important de cette architecture est sa robustesse avec les changements topologiques (à la suite d'une panne ou une défaillance) de telle sorte qu'un lien entre la source et la destination soit toujours disponible[42].

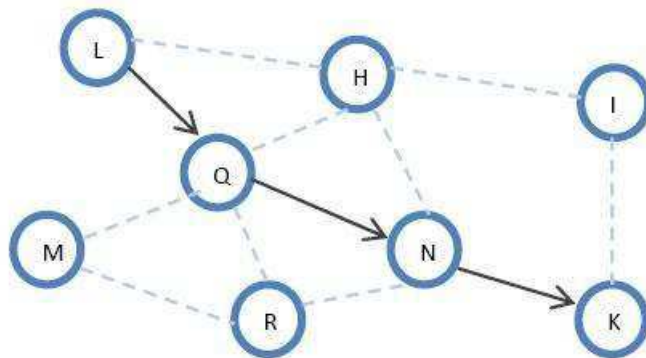


FIGURE 1.7 – Topologie plate.[52]

Architecture hiérarchisée

Contrairement à l'architecture plate, l'architecture hiérarchisée définit une hiérarchie de trois niveaux (Figure 1.8) :

- Le premier niveau est composé d'un ensemble de nœuds ordinaires dont le rôle est la détection et la transmission de l'événement vers le clusterhead correspondant. Le clusterhead et ses membres construisent un cluster.
- Le deuxième niveau comprend les clusterheads, ce sont des chefs de cluster qui gèrent la transmission des données vers la station de base.
- Le niveau le plus haut comporte la station de base dont le rôle est le traitement des informations reçues de la part des chefs de clusters.

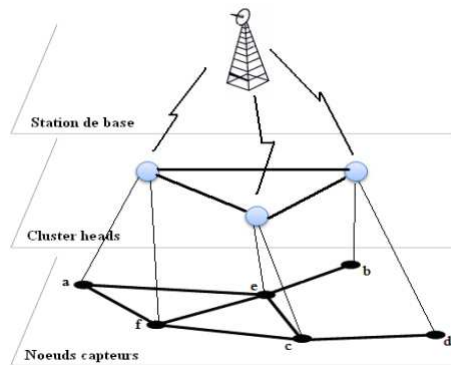


FIGURE 1.8 – Architecture hiérarchisée.[24]

1.3.7 Domaines d'application des réseaux de capteurs

Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable pour plusieurs domaines d'application, à savoir : Les applications militaires (surveillance, analyse,...), les applications environnementales (application géologique, météorologique et surveillance de la pollution), la surveillance d'énergie, les applications médicales[32], les applications commerciales[21], industrielles[40] [31] et domestiques[49].

1.3.8 Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes influençant le réseau de capteurs peuvent être résumés comme suit[24][27] :

Tolérance aux pannes : La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir un bon fonctionnement du réseau après une défaillance d'un ou plusieurs capteurs. Parmi les causes de défaillance, nous trouvons l'endommagement physique du nœud capteur ou l'épuisement de son énergie. Une panne ne doit aucunement affecter le fonctionnement global du réseau.

Scalabilité : Le nombre de nœuds capteurs déployés dans un RCSF peut être en centaines ou en milliers. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à atteindre des millions. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre important de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs [22].

Coût de production : Vu le nombre important de nœuds composant un RCSF, le coût de production d'un seul nœud capteur est très important pour évaluer le coût global du réseau. Si le coût de déploiement de ce réseau est supérieur à celui d'un réseau composé de capteurs traditionnels, alors l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas rentable en termes de coût. En conséquence, le coût de chaque nœud capteur doit être le plus bas possible [55].

Sécurité limitée : Contrairement aux réseaux de capteurs filaires classiques, les réseaux de capteurs sans fil sont plus enclins à ce type de problème. Cela est dû aux limitations physiques qui font que le contrôle de données doit être minimiser.

La consommation d'énergie : Un capteur, par sa taille, est limité en énergie ($< 1.2V$). 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 qu'il faut trouver les moyens pour réduire cette consommation [56].

Topologie et connectivité : La topologie des RCSF peut être changée au cours du temps pour certaines raisons : par exemple la mobilité des nœuds, panne des capteurs ou bien expiration de l'énergie des capteurs. Dans ces conditions, la topologie doit réagir avec ces facteurs pour maintenir le fonctionnement du réseau [41].

Lien radio : Le média de transmission pour les RCSF doit être efficace, robuste aux interférences et moins coûteux. Le média sans fil utilisé habituellement pour les réseaux de capteurs est le "Zig Bee" [28]. Ce standard est simple à employer, peut supporter un grand nombre de nœud, minimise la consommation d'énergie et offre un débit allant jusqu'à 250 kbps [35]. Ces caractéristiques rendent son utilisation pour les RCSF efficace et rentable.

Bande passante limitée : L'une des caractéristiques de ces réseaux est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage limite la bande passante qui est réservée au nœud.

Ressources limitées : Les ressources des nœuds capteurs sont limitées en ce qui concerne la capacité de stockage et la puissance de calcul car si le nœud capteur effectue des traitements qui nécessitent un calcul complexe cela peut avoir un impact direct sur la durée de vie du réseau. Réduire la consommation de ces ressources permet de prolonger la durée de vie du réseau.

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté ce qu'est un capteur, ses différents types et ses composants, les réseaux sans fil de capteurs, et ceci en se focalisant sur leurs caractéristiques, les composants, l'architecture, la topologie et l'organisation du réseau. Nous avons donné une brève description des différents domaines qui utilisent cette technologie. Nous remarquons que le plus grand problème de ces capteurs est leurs faibles durées de vie et ceci après avoir mis l'accent sur les différentes contraintes, facteurs et causes de consommation d'énergie d'un RCSF qui nous laisse conclure qu'une étude détaillée est primordiale pour le choix des capteurs et la conception du RCSF et ceci afin de minimiser la consommation d'énergie qui est un problème récurrent.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons en détails les différentes techniques de conservation d'énergie.

Chapitre 2

Techniques de conservation d'énergie

2.1 Introduction

Au vu de l'importance que prend l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans différents domaines, cette technologie commence à susciter de plus en plus d'engouement au vu des possibilités qu'elle offre. Mais contrairement aux réseaux de capteurs utilisés dans des contextes plus traditionnels tels que la médecine et l'industrie qui cherchent à optimiser et à perfectionner la qualité du service fournis, il existe un type de réseau de capteurs sans fil qui en plus doit chercher à optimiser au maximum la consommation énergétique des différents capteurs qui le compose, et ce à cause des conditions de déploiements qui les rendent souvent inaccessibles et impossible de les remplacer. De ce fait, ces réseaux doivent et ce dès leurs conceptions prendre en considération la consommation énergétique du réseau de manière globale ainsi que la consommation énergétique des nœuds qui le compose afin de maintenir un fonctionnement optimal du réseau le plus longtemps possible, et ainsi allonger la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les principales opérations qui induisent une consommation d'énergie dans un capteurs, les principales raisons de surconsommation d'énergie, ainsi que quelques techniques utilisées afin de limiter cette dernière et mieux l'optimiser.

2.2 Définitions

2.2.1 Durée de vie d'un réseau de capteurs

La durée de vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle un réseau de capteurs peut maintenir son fonctionnement tout en gardant une couverture sur l'entièreté de la zone étudiée par le réseau. Autrement dit, la durée de vie d'un RCSF dépend de la durée de vie de ses nœuds, aussi appelée vie nodale qui correspond à la vie d'un seul nœud du réseau. Cette vie dépend de deux facteurs : l'énergie que consomme le nœud et la quantité d'énergie dont dispose sa batterie.

2.2.2 Couverture

La zone de couverture d'un nœud représente la zone dans laquelle le nœud peut détecter les phénomènes qu'il étudie. Cette zone est en théorie un disque circulaire de rayon R avec le nœud en son centre, en pratique elle peut ne pas être circulaire en raison de la topologie de la zone de déploiement du capteur.

2.2.3 Degré de couverture

Le degré de couverture désigne le nombre de nœud qui couvre une même zone donnée en même temps. On parle de 1-couverture si pour chaque point P d'une zone, il existe un seul

capteur unique qui couvre ce point. Et par généralisation, on parlera de k -couverture lorsque pour chaque point P d'une zone donnée, il existe k capteurs qui couvrent ce même point P [39].

2.2.4 Connectivité

La connectivité représente la capacité pour 2 nœuds donnés peuvent communiquer entre eux de manière symétrique, c'est-à-dire pour deux capteurs u et v donnés, on dit que u et v peuvent communiquer symétriquement entre eux si et seulement si la distance euclidienne qui sépare les 2 nœuds est inférieurs ou égale au plus petit rayon des 2 capteurs ($(u, v) = MIN(R_C(u), R_C(v))$) tel que R_C est le rayon de communication d'un nœud).

2.2.5 Degré de connectivité

Le degré de connectivité représente le nombre de chemins en entre 2 capteurs donnés, on dit qu'un réseau est 1-connexe s'il existe au moins un chemin entre 2 capteurs. Par généralisation, on parlera de connectivité k -connexe s'il existe k chemins disjoints entre 2 capteurs uniques.

2.3 Source de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs

On peut distinguer trois opérations qui induisent une consommation d'énergie dans un nœud[39] :

2.3.1 Énergie de capture

C'est l'énergie utilisée par le capteur lors de son activation et sa collecte de données ainsi que les différentes tâches qui s'en suivent telles que l'échantillonnage, le traitement de signal, la conversion analogique/numérique des données, et l'activation de la sonde. Généralement cette partie représente un faible pourcentage de l'énergie consommée par un nœud.

2.3.2 Énergie de traitement

On en distingue deux parties, la première est l'énergie de commutation, c'est l'énergie consommées par le capteur lors de l'activation de son unité de traitement. La deuxième est l'énergie de fuite, c'est l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul est activée mais ne fait aucun traitement.

2.3.3 Énergie de communication

C'est l'énergie consommée lors des échanges d'information entre les capteurs ou entre un nœud et une passerelle. L'énergie consommée lors d'un échange d'information est déterminée par deux facteurs : Le premier est la quantité de données à envoyer tandis que le second est la distance de transmissions . La communication représente la partie qui consomme le plus d'énergie dans un nœud, bien plus que le traitement et la capture, de ce fait, c'est généralement la partie qu'on cherche le plus à optimiser lors de la conception d'un RCSF.

2.4 Sources de surconsommation d'énergie

La durée de vie d'un réseau de capteurs dépend de la bonne gestion de la consommation d'énergie, pour cela notre réseau doit éviter toutes causes d'épuisement rapide de la batterie tel qu'un grand trafic de contrôle qui peut engendrer l'écrasement de la batterie. Dans cette partie nous nous intéressons à ces causes[24] :

2.4.1 Les collisions

Elles se produisent dans un RCSF lorsque deux ou plusieurs capteurs de mêmes cellules émettent simultanément leurs informations détectées. La présence de ces collisions engendre un gaspillage d'énergie lors de l'émission et la réception de données et cela se répercute sur la transmission qui est non optimale, une énergie supplémentaire est exigée lors de la phase de retransmission.

2.4.2 L'écoute abusive (Overhearing)

L'écoute abusive se produit lorsqu'un capteur reçoit des paquets de broadcast ou bien des paquets qui ne lui sont pas destinés. La consommation d'énergie engendrée par l'écoute abusive dépend principalement de la taille des paquets reçus. Elle sera l'origine de la perte d'énergie dans le cas où la taille des messages est très importante.

2.4.3 L'écoute à vide (Idle listening)

Lorsqu'un nœud n'est pas entrain d'envoyer ou recevoir des paquets, il se met en écoute de la porteuse et ça afin de recevoir un éventuel trafic. Dans cette situation, la quantité d'énergie gaspillée peut être équivalente à une réception normale.

2.4.4 Paquets de contrôle (Overhead)

Les paquets de contrôle consomment de l'énergie lors de leurs émission et réception et ça malgré qu'ils ne communiquent aucune information intelligente. On ne peut pas négliger cette consommation surtout dans le cas où la taille du trafic est grande

2.4.5 Non disponibilité du récepteur (overmitting)

Ce phénomène se réalise lorsqu'un nœud n'est pas prêts à recevoir des données qui lui sont destinées. Il dégrade les performances du réseau et entraine des retransmissions successives.

2.5 Techniques de conservation d'énergie dans les RCSFs

Nous allons présenter les différentes techniques de conservation d'énergie proposées dans la littérature. Nous nous intéressons seulement aux techniques qui permettent de réduire la consommation d'énergie du sous système de communication. La figure 2.1 résume ces techniques.

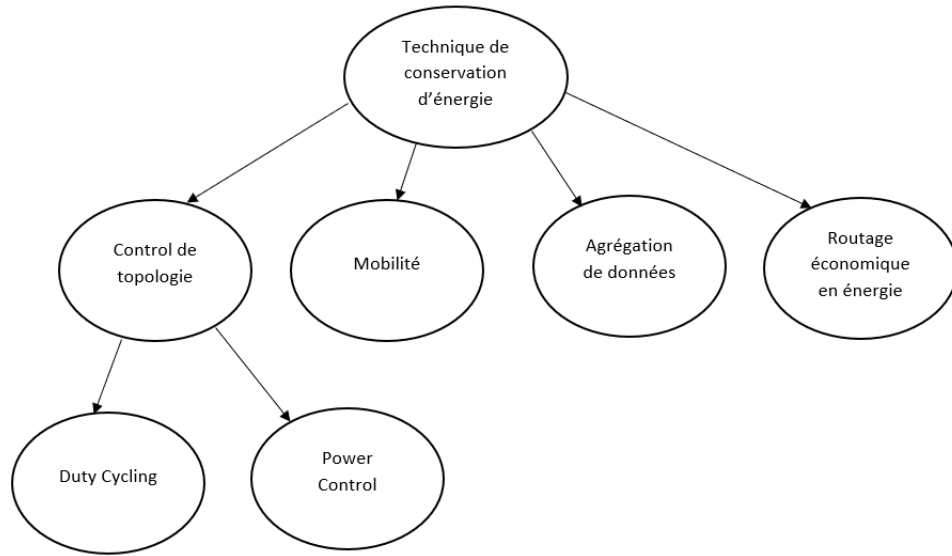


FIGURE 2.1 – Techniques de conservation d'énergie.

2.5.1 Routage économique en énergie

A cause des contraintes énergétiques imposées par les capteurs, les avantages offerts par l'utilisation des RCSF est sévèrement restreint. Car les dépenses énergétiques se produisent lors de la communication sans fil qui consiste en l'opération de captage et de traitement de données. En effet, la plupart des protocoles de routage aspirent à économiser l'énergie plutôt qu'à obtenir une haute qualité du signal et de service car cela se trouve inapplicables dans un environnement contrairement aux réseaux filaires. Il existe trois catégories de protocoles de routage de RCSF, les protocoles dit hiérarchiques dont l'objectif principal est de maintenir efficacement la consommation d'énergie des nœuds de capteurs, les protocoles basés sur la localisation qui utilisent les informations de localisation pour guider la découverte de routage et la transmission des données ainsi que les protocoles dit "data-centric".[47]

2.5.2 Agrégation de données

L'agrégation de données dans les réseaux de capteurs consiste à remplacer les lectures individuelles de chaque capteur par une vue globale, collaborative sur une zone donnée [58]. Avec l'utilisation des fonctions d'agrégat : MAX, MIN, MOYENNE. -Les figures 2.2 et 2.3 représentent un exemple sans et avec agrégation. Nous remarquons que dans la figure 2.2 , 20 messages sont envoyés sur le réseau de capteurs. Par contre en utilisant le mécanisme d'agrégation de données, (Figure 2.3) 8 messages seulement sont envoyés sur le réseau ce qui permet la réduction de l'énergie des capteurs surtout les nœuds 6 et 8.

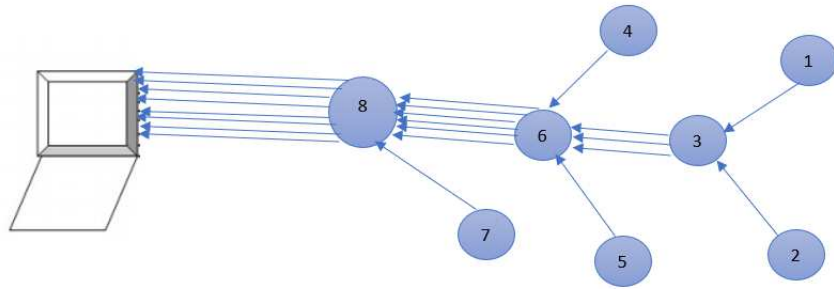


FIGURE 2.2 – Envoi de données sans agrégation.

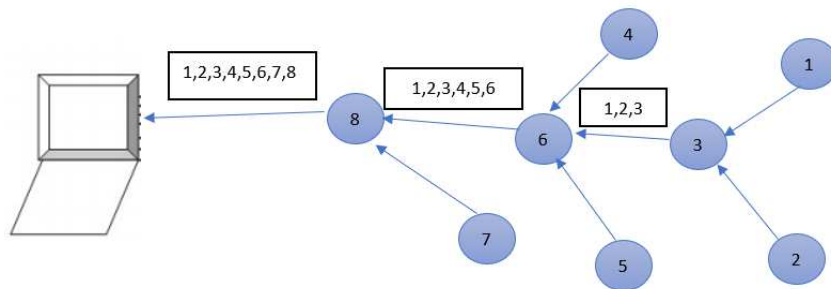


FIGURE 2.3 – Envoi de données avec agrégation.

2.5.3 Technique de mobilité

Dans un réseau de capteurs, les paquets provenant des nœuds suivent des chemins multi-sauts vers la station de base. Ainsi, certains chemins peuvent être sollicités plus que d'autres. Les nœuds qui appartiennent à ce chemin et les nœuds proches de la station de base consomment leur énergie plus rapidement que les autres. Ceci a donné naissance à une approche reposant sur la mobilité des nœud-capteurs. Les stratégies reposant sur la mobilité peuvent être classées en deux catégories : les stratégies avec un Sink mobile et les stratégies avec des relais mobiles, selon le type de l'entité mobile.

Parmi les solutions proposées pour la mobilité, nous trouvons le déplacement des nœuds capteurs sur des éléments mobiles tels que des voitures, robots ou animaux. Cette solution est plutôt tolérante aux pannes et n'engendre aucun surplus de consommation. Nous trouvons aussi parmi ces solutions l'intégration d'un module de mobilité aux nœuds. Cependant, ce module consomme beaucoup d'énergie.

2.5.4 Contrôle de topologie

Le contrôle de topologie est très utile car sans lui notre réseau de capteurs sans fil souffrira de plusieurs problèmes tels qu'une durée de vie courte, un niveau d'interférence élevée ou des défaillances fréquentes des nœuds. . . etc.

Définition

Le contrôle de topologie est la réorganisation et la gestion des paramètres des nœuds et leurs modes de fonctionnement afin de modifier la topologie du réseau dans le but de prolonger sa durée de vie tout en préservant la connectivité, la couverture et réduisant le taux d'interférences [51].

Dans la plupart des cas, le déploiement d'un réseau de capteurs se fait de façon aléatoire et avec une grande densité, ce qui engendre une redondance des nœuds et un gaspillage d'énergie lors de la transmission. Pour pallier ce problème, deux techniques sont utilisées à savoir : le Duty Cycling et le Power Control (Figure 2.4).

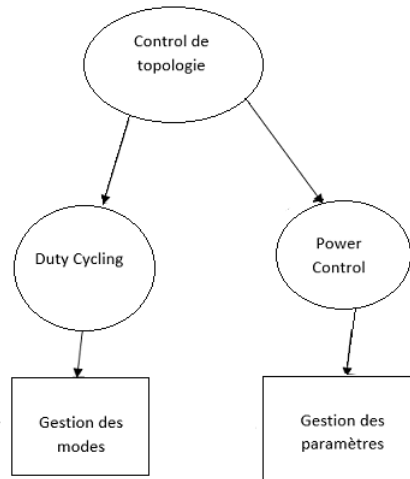


FIGURE 2.4 – Techniques de contrôle de topologie.

Duty Cycling

Le moyen le plus efficace pour la préservation de l'énergie des capteurs est de mettre en veille prolongée l'émetteur récepteur radio à chaque fois que la communication peut être évitée. Dans le meilleur des cas, la radio doit s'éteindre dès qu'il n'y a aucun paquet à envoyer/recevoir, et reprendre dès qu'un nouveau paquet de données est prêt.

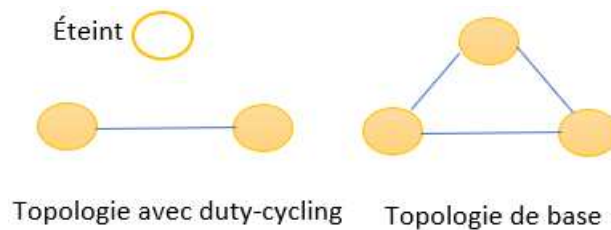


FIGURE 2.5 – Exemple de Duty Cycling.

Un cycle se compose de deux périodes : la période active qui consiste à ce que le nœud peut envoyer et de recevoir des paquets et la période de sommeil (Sleep) où la radio du capteur est éteinte (Figure 2.6).

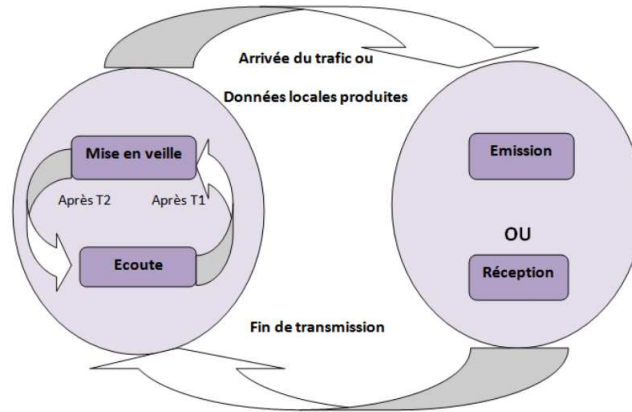


FIGURE 2.6 – Cycle de Sleep/Awaked'un capteur[45].

L'alternance de l'activité des nœuds permet d'économiser l'énergie et que le réseau fonctionne avec un faible cout, voire très faible (low duty-cycle et ultra-low duty-cycle).

Le fonctionnement en alternance des nœuds (Active/Sleep) oblige de coordonner la période d'activité entre un émetteur et un routeur, ou entre des nœuds voisins, ce qui rend l'échange de paquets possible même avec des nœuds qui utilisent un faible duty-cycling. Tout système de duty-cycling doit être accompagné par un algorithme d'ordonnancement Active/Sleep. C'est un algorithme distribué sur la base que les nœuds décident de transiter de l'état actif à l'état sommeil, et inversement.

Power Control

Dans cette technique, le contrôle de topologie est défini comme le problème d'attribution des puissances de transmission aux différents nœuds du réseau afin que la topologie du réseau atteigne certaines propriétés de connectivite et que la consommation d'énergie des nœuds soit réduite [50]. La haute densité de déploiement des nœuds capteurs favorise l'utilisation des communications multi-sauts qui consomment moins d'énergie que les communications traditionnelles à un seul saut. Dans certains cas, une transmission via un long lien radio consomme plus d'énergie qu'une transmission en mode multi-sauts via des liens de courte portée[42].

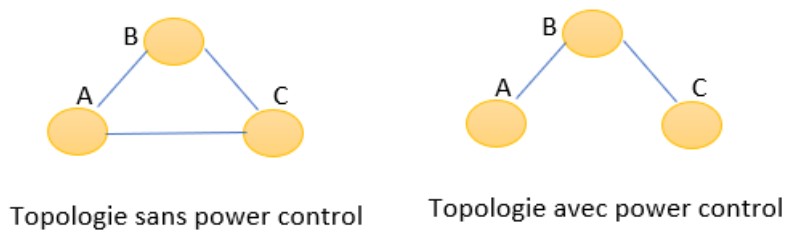


FIGURE 2.7 – Exemple de Power Control.

2.5.5 Conclusion

Vue la petite taille d'un capteur, sa batterie sera de très faible durée alors nous devons prendre en considération la conservation de l'énergie comme un aspect très important dans un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie de ce dernier. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes causes de pertes d'énergie et les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Parmi les techniques les plus intéressantes nous trouvons le contrôle de topologie qui peut utiliser soit le duty cycling soit le power contrôle pour minimiser la consommation d'énergie des capteurs et prolonger ainsi la durée de vie du réseau. Dans le chapitre suivant, nous allons nous focaliser sur quelques protocoles basés sur le contrôle de topologie.

Chapitre 3

PROTOCOLE DE CONTRÔLE DE TOPOLOGIE

3.1 Introduction

Le but du contrôle de topologie est d'utiliser la redondance des nœuds pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs. Cette technologie comprend l'élimination des nœuds et des liaisons inutiles pour réduire la consommation d'énergie du réseau et prolonger sa durée de vie. La consommation d'énergie des nœuds d'écoute inactifs étant comparable à celle des nœuds actifs dans les réseaux de capteurs sans fil, le Duty cycling permet de réduire au mieux la consommation d'énergie. La tâche du contrôle de topologie est de sélectionner les nœuds qui sont en veille et ceux qui seront éveillés tout en garantissant la connectivité. Par conséquent, le contrôle de topologie basé duty cycling permet de trouver le meilleur sous-ensemble de nœuds pour assurer la connectivité du réseau. D'autre part, les nœuds capteurs nécessitent une certaine quantité de puissance d'émission pour envoyer des messages à ces voisins. Plus la puissance qu'un nœud envoie des paquets de données est élevée, plus il consommera d'énergie. Par conséquent, il n'est pas souhaitable que les nœuds transmettent avec une puissance maximale afin de pouvoir économiser de l'énergie et ainsi prolonger la durée de vie du réseau. Par conséquent, le but du contrôle de topologie basé power control est de trouver le meilleur sous-ensemble de liaisons, d'ajuster la puissance de transmission des nœuds et d'assurer en même temps la connectivité du réseau.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques protocoles de contrôle de topologie basés Duty Cycling et Power control. Nous présentons leurs hypothèses, objectifs, idée de base et fonctionnement général.

3.2 Protocoles basés Duty Cycling

3.2.1 GAF : Geographic Adaptive Fidelity

Hypothèses

- Chaque nœud doit être équipé d'un système de suivi, tel qu'un GPS ou une autre technologie de suivi.
- Tous les nœuds ont le même rayon de communication.

Objectifs

- Gestion de la mobilité : elle est principalement utilisée pour les réseaux ad hoc.
- Réduire la consommation d'énergie : il n'y a qu'un seul nœud actif dans chaque réseau.
- Assurer la connectivité.

-Assurer l'équité du partage des tâches entre les nœuds en changeant régulièrement les nœuds actifs.

Idée de base

GAF[53] est un protocole de contrôle de topologie basé sur la localisation. Il réduit la consommation d'énergie tout en maintenant une fidélité de routage constante. La zone de détection du nœud déployé est divisée en petites grilles virtuelles adjacentes. Si tous les nœuds de A peuvent communiquer avec tous les nœuds de B, alors les deux grilles A et B sont dites adjacentes. Tous les nœuds de la même grille virtuelle sont équivalents au routage et un seul nœud est requis pour être actif. Par conséquent, ces nœuds doivent se coordonner les uns avec les autres pour décider quels nœuds peuvent dormir et pendant combien de temps. La taille de la grille dépend en grande partie du rayon de communication du nœud, qui est défini comme suit : $r^2 + (2r)^2 \leq R^2$ ou bien : $r \leq R/\sqrt{5}$ tel que "R" est le rayon de communication et "r" est la taille de la grille.

Fonctionnement

Les nœuds peuvent être dans l'un des trois états : Sleep, Discovery et Actif (Figure 3.1). Au départ, un nœud commence par l'état Discovery, dans lequel il échange des messages pour déterminer les nœuds de la même grille. Le nœud utilise son emplacement et la taille de la grille pour déterminer l'ID de la grille. Le nœud en état de découverte initialise le temporisateur Td et envoie un message de "découverte". Le but de cette attente (Td timer) est de réduire les collisions de messages. À l'expiration du délai Td, le nœud diffuse son message de découverte et entre à l'état actif pendant une durée Ta. Lorsque le nœud revient à l'état actif, il diffusera périodiquement des messages de découverte. À la fin de cette période, le nœud retourne à l'état de découverte, et le nœud dans l'état de découverte ou actif peut déterminer qu'il est dans un état redondant ou la tâche de routage peut être fournie par un autre nœud équivalent, passant ainsi à un état de veille. Lorsqu'il se mettra en veille, il éteindra sa radio et réglera une minuterie Ts calculée en fonction de Ta (temps actif du nœud actif).

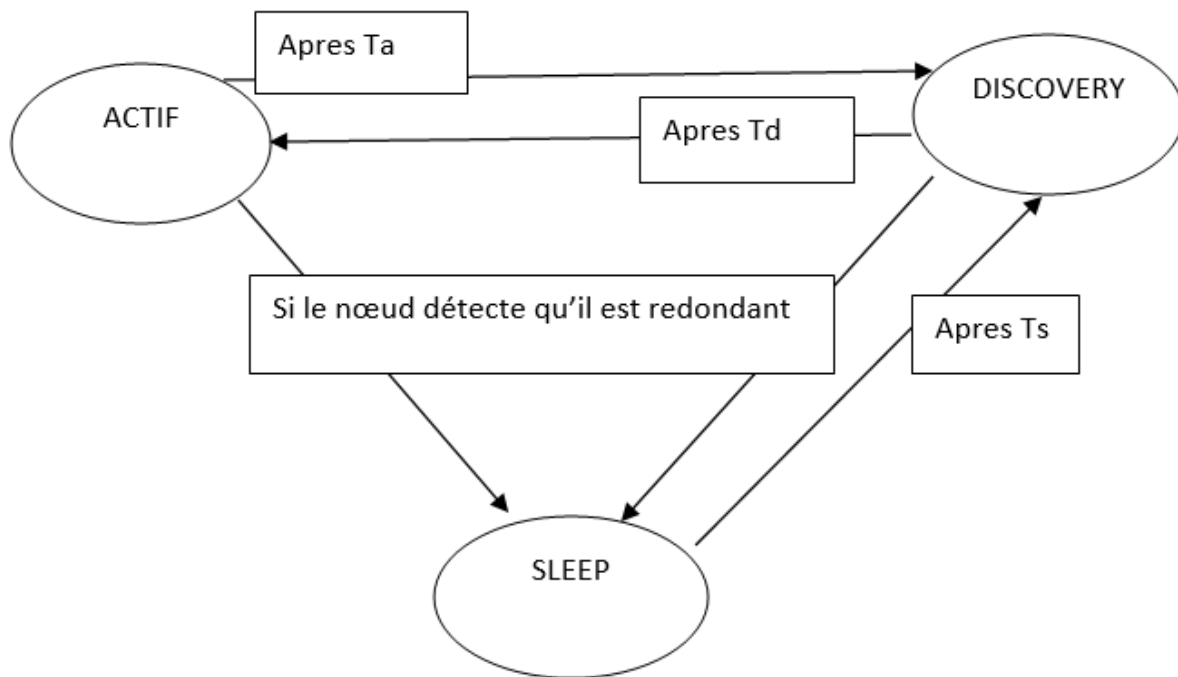


FIGURE 3.1 – Diagramme d'état de transition du protocole GAF.

3.2.2 ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies

Hypothèses

- Tous les nœuds doivent connaître leurs voisins.
- Tous les nœuds doivent pouvoir s'auto-configurer.

Objectifs

- Réduire la consommation d'énergie : en minimisant le nombre de nœuds actifs.
- Assurer la connectivité.
- Réduire le nombre de messages perdu.

Idée de base

ASCENT [29] est un protocole distribué qui permet aux nœuds d'ajuster leur état en fonction des conditions du réseau et de changer le mode de fonctionnement (actif ou passif) selon les besoins. Par conséquent, lorsqu'un nœud détecte un taux de perte de paquets élevé, il en informera ses voisins, puis les voisins décideront de passer de l'état « veille » à l'état « actif » et de participer au routage. Le fonctionnement ASCENT est affecté par deux paramètres : le taux de perte admissible et le degré moyen de connexion réseau (Connectivité).

Fonctionnement

Dans ASCENT, un nœud est dans un des états suivants : Actif, Passif, Sleep, Test (Figure 3.2) Initialement, un compteur aléatoire est initialisé pour éviter la synchronisation. Les nœuds démarrent dans l'état « test » et échangent des informations et des messages de contrôle. Un nœud à l'état « test » attend la fin du timer T pour entrer dans l'état actif, à moins qu'il ne détecte qu'il y ai plusieurs nœuds actifs supérieurs ou égaux à un certain seuil (NT) avant l'expiration de T, ou le taux de perte (DL) est en dessous du taux de perte avant d'entrer dans l'état Test. Une fois le nœud à l'état passif, il initialisera son compteur P et enverra un message « Annocement Message ». Le nœud actif utilise ces informations pour estimer la densité du voisin et la diffuse à tous les nœuds passifs du voisin. À la fin de P, le nœud entre dans un état de veille pour économiser la consommation d'énergie .A la fin de P, si le nombre de voisins est inférieur au seuil NT et le nœud reçoit un message HELP du nœud actif (quel que soit le taux de perte), le nœud passera à l'état « Test ».

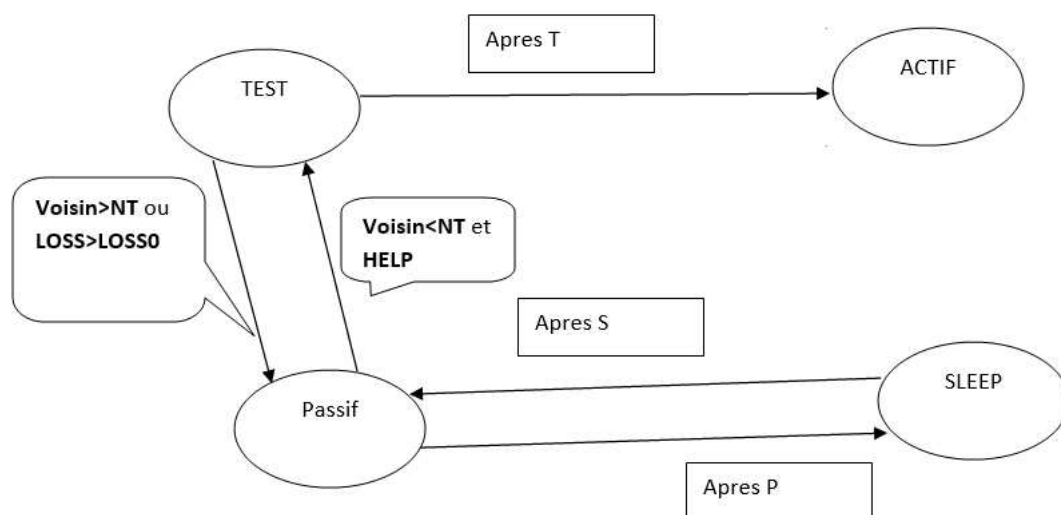


FIGURE 3.2 – Diagramme d'état de transition du protocole ASCENT.

3.2.3 SPAN

Hypothèses

-Le protocole utilise les informations de topologie fournies par le protocole de routage pour découvrir les modifications des voisins et y réagir.

Objectifs

- Assurer la connectivité.
- Il tente de minimiser le nombre de nœuds sélectionnés en tant que coordinateur, augmentant ainsi la durée de vie du réseau sans provoquer de coupures ou de retards importants.
- Lors de l'élection des coordinateurs, chaque nœud interroge uniquement les informations locales de manière distribuée.
- Le taux de consommation d'énergie de tous les nœuds est à peu près le même (rôle de coordinateur rotatif).

Idée de base

SPAN[30] est un protocole distribué dans lequel les nœuds décident de dormir ou de rejoindre la topologie selon une décision locale du coordinateur. Les coordinateurs restent éveillés et effectuent plusieurs routages multi-sauts des paquets dans le réseau, tandis que les autres nœuds restent en mode économie d'énergie (mode sleep).

Les nœuds non coordinateurs détermineront périodiquement s'ils doivent devenir coordinateurs. Afin d'assurer un nombre suffisant de coordinateurs, SPAN utilise la règle d'éligibilité : si deux voisins d'un nœud non coordinateur ne peuvent pas se joindre directement ou via un ou plusieurs coordinateurs, le nœud doit devenir coordinateur afin d'empêcher plusieurs nœuds de décider de devenir le coordinateur en même temps, et cela dans le cas où les nœuds trouvent que le coordinateur est absent en même temps. Afin de résoudre ce problème, le nœud reportera son annonce pour devenir le coordinateur à travers un délai de temporisation aléatoire donné par la formule.

Chaque nœud utilise une fonction qui génère un temps aléatoire en prenant en compte à la fois le nombre de voisins qui peuvent être connectés avec ce nœud et son énergie résiduelle. Les idées fondamentales sont les suivantes : -Les nœuds avec une espérance de vie plus longue devraient être plus susceptibles de devenir volontairement des coordinateurs.

-Le coordinateur doit être sélectionné pour réduire son nombre et le nœud ne doit se retirer en tant que coordinateur.

$$delay = ((1 - \frac{E_r}{E_m}) + (1 - \frac{C_i}{\binom{N_i}{2}}) + R) \times N_i \times T \text{ Où :}$$

E_r : Quantité d'énergie restante dans le nœud.

E_m : Quantité maximale d'énergie disponible dans le nœud (Energie Initiale).

C_i : nombre de paires de nœuds qui vont être connectées si le nœud i devient coordinateur.

N_i : Nombre de voisins du nœud i .

T : temps d'un aller-retour d'un message dans un environnement sans fil.

R : rayon de communication.

Fonctionnement

Initialement, tous les nœuds sont à l'état "découvert" pendant une durée T_d (Figure 3.3). Pendant cette période, le nœud écoute les messages HELLO. Après la fin de T_d , chaque nœud décide s'il devient un "coordinateur" et envoie son nouvel état dans un message HELLO. Le nœud décide s'il doit devenir un "coordinateur" selon les règles d'éligibilité ci-dessus. Afin de minimiser le nombre de nœuds coordinateurs, dans la phase de «découverte», lorsqu'un nœud

reçoit un message HELLO pour l'informer qu'un nœud s'est déclaré coordinateur, il arrêtera sa phase de «découverte» et passera ensuite à l'état "non-coordinateur". Le nœud joue le rôle du coordinateur pendant une certaine période dépassant cette période, le coordinateur entre dans l'état "tentative".

Si chaque paire de voisins peut se rejoindre directement ou par l'intermédiaire d'un ou deux coordinateurs, ou si le coordinateur a dépassé son temps d'activité, le coordinateur entrera dans l'état "tentative". Afin d'éviter la perte des données pendant l'intervalle de temps où l'ancien coordinateur annonce son retrait, l'ancien coordinateur continuera à acheminer des paquets de données pendant un certain temps jusqu'à ce qu'un nouveau coordinateur soit élu.

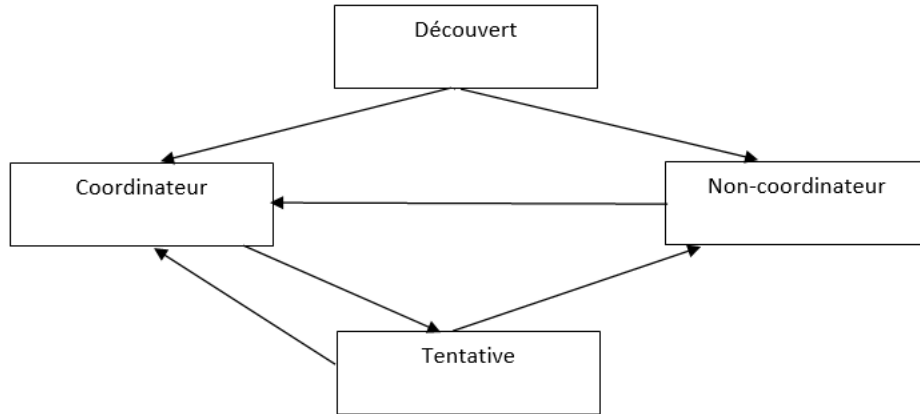


FIGURE 3.3 – Diagramme d'état de transition du protocole SPAN.

3.2.4 CPA : Connectivity based Partitioning Approach

Hypothèses

- La topologie est divisée en groupes afin qu'un seul nœud de chaque groupe soit en mode actif, tandis que les autres nœuds passent en mode veille.
- Chaque nœud peut communiquer directement avec n'importe quel autre nœud du même groupe. Tout nœud est éloigné de tous les autres nœuds du même groupe.
- Le réseau de base composé de nœuds actifs doit répondre à certains degrés de connectivité afin de ne pas subir de perte significative de qualité de communication par rapport au réseau d'origine.

Objectifs

- Conserver l'énergie des nœuds.
- Assurer la connectivité.
- Par rapport au réseau d'origine, la qualité de la communication ne doit pas subir de pertes importantes. Il y a un petit nombre de groupes possibles.

Idée de base

CPA [33] est un processus itératif distribué, il est basé sur la mesure de connectivité entre les nœuds. CPA vise à diviser les nœuds en groupes de taille appropriée pour assurer la connectivité du réseau de base. Il commence à partir de la partition initiale et chaque nœud forme un groupe distinct. Il existe deux types de nœuds dans chaque groupe : les nœuds ordinaires et un nœud tête. Chaque type de nœud conserve : l'identifiant, les informations de groupe associées, son numéro de groupe, l'ID des autres membres du groupe et l'en-tête ID de nœud du groupe. Un

nœud tête maintient quelques informations supplémentaires sur la connectivité entre son groupe et les groupes voisins.

Fonctionnement

Initialement, chaque nœud constitue un groupe (ou nœud principal)(Figure 3.4). Tout d'abord, chaque nœud diffuse un message UPDATE contenant ses informations de groupe à ses voisins. Dans l'état de décision, le nœud principal calculera une valeur d'utilité correspondant à la priorité pour chaque groupe complètement adjacent, et sélectionnera le groupe avec la priorité la plus élevée sous la condition que la fusion ne détruira pas les contraintes de connectivité. Soit Ax le groupe actuel et suppose le meilleur groupe fusionné avec Ay. Si des groupes complètement adjacents d'Ax ou d'Ay sont dans l'état « fusion » ou « maintien », le nœud principal entrera dans l'état d'attente, car la fusion d'Ax et Ay entrera en conflit avec la fusion de certains groupes. Sinon, le nœud principal entrera dans un état "compétition". Une fois la fusion terminée, il diffusera un MSG UPDATE contenant les informations du groupe nouvellement formé à ses groupes voisins. Si le nœud principal n'est pas encore entré dans l'état "Fusion", il entrera dans l'état "Maintien" lorsqu'il recevra le MSG HOLD de son groupe voisin. Lorsque le nœud principal est dans l'état « hold » ou « wait », une fois qu'il reçoit le MSG UPDATE, il entre dans l'état de décision.

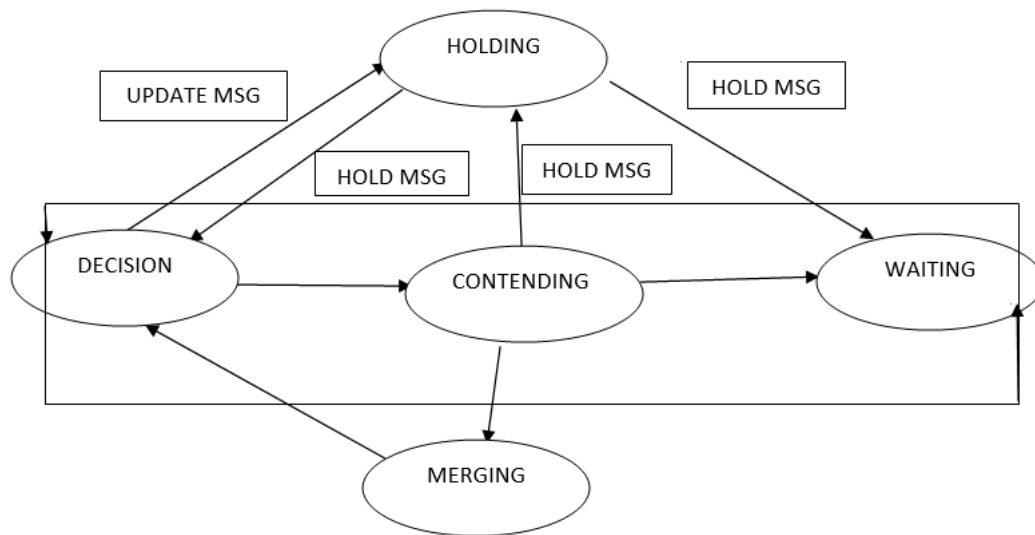


FIGURE 3.4 – Diagramme d'état de transition du protocole CPA.

3.2.5 GECP :Groupe based Energy-Conserving Protocol

Hypothèses

- On considère que le réseau de capteurs est homogène.
- Les nœuds sont supposé être statique.
- Tous les nœuds on le même rayon de communication.
- On considère que la seul raison de l'arrêt des nœuds est la fin de vie de batterie.

Objectifs

- Prolonger la durée de vie du réseau en minimisant la consommation électrique des nœuds et les connexion réseau.
- Réduire la consommation d'énergie : il n'y a qu'un seul nœud actif dans chaque réseau.
- Assurer la connectivité.

Idée de base

GECP[60] est un protocole distribué qui exploite la grande densité de nœuds déployés dans une même zone. En effet, les nœuds déployés dans la même région collecte généralement la même information. Par conséquent, afin d'économiser l'énergie du réseau, une programmation des activité est nécessaire afin de permettre aux nœuds redondants d'entrer en état "Sleep" tout en laissant les autres nœuds actifs et ce de manière cyclique. Afin de mettre en place un protocole pareil, l'algorithme se divise en trois phases :

Phase de découverte : Initialement, chaque nœuds va découvrir ses voisins en diffusant un message "HELLO" a tout capteurs proche (un Broadcast) qui contient l'identifiant du nœud émetteur. A la fin de cette phase, chaque nœud crée une liste de ses voisins.

Phase de création des groupes : Après la phase de découverte, la phase de création des groupes commence. Chaque nœud diffuse un message "DISCOVERY" qui contient son ID ainsi que sa liste de voisins. Ce Processus permet à chaque nœud de construire sa liste de voisins à deux sauts. Après ça, chaque nœud calcule localement sa liste de voisins équivalents :

-D'abord, chaque nœud sélectionne les nœuds voisins qui ont le même degré que lui.

-Après cela, chaque nœud calcule la liste des voisins avec chacun de ses voisins et détermine sa liste de voisins équivalents. On dit que deux nœuds sont équivalent si ils ont les même voisins. Cette méthode permet de former les groupes de manière indépendante de telle sorte à ce que tout les nœuds aient les même informations.

Phase d'élection Le but du protocole GECP est d'exploiter la redondance de ses nœuds afin de conserver l'énergie et la connectivité du réseau, afin d'arriver à ce résultat, un seul nœud sera choisi comme nœud actif dans chaque groupe formé à la fin de la phase précédente et les autres nœuds passent en mode "Sleep". Le choix du nœuds à activer est basé sur le niveau d'énergie des nœuds du groupe. En effet, la priorité est donnée au nœud possédant la plus grande quantité d'énergie, si il existe plusieurs nœuds avec le même niveau d'énergie, l'identifiant des nœuds est utilisé comme critère de sélection, le nœud avec l'id le plus élevé est celui qui sera activé, les autres passerons en état "Sleep"

3.2.6 Discussion

| | |
|---------------|---|
| | GAF |
| Avantages | -Promouvoir le développement à grande échelle. -Réduire la consommation d'énergie -Gère la mobilité -Assurer l'équité en adoptant la planification à tour de rôle. |
| Inconvénients | - Perte de données dans la phase de transition de l'état actif à l'état sleep. -Le système de positionnement (GPS) gaspille de l'énergie. -Envoi périodique des messages Hello. |
| | ASCENT |
| Avantages | - Limite la perte de paquets de données due aux conflits. |
| Inconvénients | - Pas de tolérance aux pannes. -Pas d'équité en adoptant un scheduling jusqu'à l'épuisement de la batterie. |
| | SPAN |
| Avantages | - Permet de minimiser les interférences. - Autoriser autant de nœuds que possible pour éteindre la radio. - Équitable (load-balancing) |
| Inconvénient | - Besoin de coordonner avec le protocole de routage. - Overhead (broadcast périodique des messages hello). |
| | CPA |
| Avantage | -Support une connectivité élevée. -Maintenir la qualité de la communication en réduisant la perte de données. |
| Inconvénient | -Un grand nombre d'échanges de messages entre groupes adjacents. -Problème d'interblocage(deadlock) |
| | GECP |
| Avantages | -Promouvoir le développement à grande échelle. -Réduire la consommation d'énergie. |
| Inconvénient | -Pas d'équité en adoptant un scheduling jusqu'à l'épuisement de la batterie. |

TABLE 3.1: Avantages et Inconvénients des protocoles Duty-Cycling.

3.3 Protocole Power Control

Le but primaire du contrôle de topologie basé power control est de créer un algorithme qui optimise l'utilisation de l'énergie et maintient une connectivité réseau et optimise les performances (Augmentation de la durée de vie du réseau) et ce en ajustant la puissance de transmission et de réception. Autrement dit, le contrôle de topologie basé power control est une méthode où un nœud peut sélectionner un groupe de voisins et établir un lien logique de données et ajuster dynamiquement la puissance de transmission pour les différentes liaisons. Le problème TC peut être formalisé de la manière suivante : Chaque nœud $u \in N$ (N l'ensemble des nœuds) a une fonction de puissance p , où $p(d)$ donne la puissance minimale nécessaire pour établir une liaison de communication avec un nœud $v \in N$ à une distance d loin de u . Supposons que la puissance d'émission maximal P soit la même pour chaque nœud, et la distance maximal pour que deux nœuds puissent communiquer directement est R , c'est-à-dire, $p(R) = P$. Si chaque nœud transmet avec la puissance P , alors nous avons un graphe induit $G_R = (V, E)$. Le but dans l'exécution de TC est de trouver un sous graphe G de G_R tel que[54] :

- G se compose de tous les nœuds de G_R mais à moins d'arêtes.

-Si u et v sont connectés dans G_R , ils sont toujours connectés dans G , et

-Si un nœud u peut transmettre à tous ses voisins dans G en utilisant moins de puissance que

nécessaire pour transmettre à tous ses voisins dans G_R .

Dans ce qui suit, nous allons présenter certains protocoles de contrôle de topologie basés sur le Power Control.

3.3.1 LMST : Local Minimum Spanning Tree

Hypothèses

- Le canal de propagation est symétrique et sans obstacle.
- Chaque nœud est équipé de la capacité à recueillir ses informations de localisation via GPS.
- Un identifiant unique (tel qu'une adresse IP/MAC) est assigné à chaque nœud.
- Le voisinage visible d'un nœud u est défini par un ensemble de nœuds que u peut atteindre en transmettant à puissance maximale.

Objectifs

- Construire un arbre fortement connexe couvrant tous les sommets de poids minimum.
- Préserve la connectivité originale du réseau et le degré de chaque nœud est bornée à 6.
- Réduire la puissance de transmission ainsi que la consommation d'énergie tout en maintenant la connectivité.

Idée de base

La topologie LMST est construite par chaque nœud qui construit individuellement son MST local et en ne gardant que les nœuds à un saut comme voisins[43]. L'algorithme proposé est composé des trois phases suivantes :

1-Echange d'informations : L'information nécessaire à chaque nœud u dans le processus de construction de la topologie est l'information de tous les nœuds dans le voisinage visible. Ceci peut être obtenu en ayant chaque nœud qui transmet un message "HELLO" périodiquement en utilisant sa puissance de transmission maximal. Ce message "HELLO" doit au moins contenir l'identifiant du nœud émetteur ainsi que sa position. L'intervalle entre deux transmissions du message dépend du niveau de mobilité des nœuds.

2-Construction de la topologie : Après avoir obtenu les informations sur le voisinage visible, chaque nœud applique l'algorithme de Prim de manière indépendante afin d'obtenir son MST local. Il est à noter que d'abord, pour construire un MST efficace énergétiquement, le poids d'un arc doit représenter la puissance maximale entre deux nœuds. Ensuite, MST dérivé grâce à l'algorithme de Prim peut ne pas être unique. Afin d'assurer l'unicité et garantir la connectivité, une fonction de pondération est défini comme suit :

Étant donné deux arêtes $(u1, v1)$ et $(u2, v2)$, la fonction de poids $d : E \rightarrow \mathbb{R}$ définit comme suit :

Si $d'(u1, v1) > d'(u2, v2) \Leftrightarrow d(u1, v1) > d(u2, v2)$

ou

$(d(u1, v1) = d(u2, v2) \wedge \max\{id(u1), id(v1)\} > \max\{id(u2), id(v2)\})$

ou

$(d(u1, v1) = d(u2, v2) \wedge \max\{id(u1), id(v1)\} = \max\{id(u2), id(v2)\} \wedge \min\{id(u1), id(v1)\} > \min\{id(u2), id(v2)\})$

La fonction de poids d garantie qu'à chaque étape de l'algorithme de Prim, le choix sur les liens de poids minimum est unique et de ce fait que le MST construit par un nœud u l'est aussi.

3- Détermination de la puissance de transmission : On suppose que la puissance de transmission maximal est connue et est la même pour tous les nœuds. En mesurant la puissance de réception des messages "HELLO", chaque nœud peut déterminer le niveau de puissance dont

il a besoin pour atteindre ses voisins. Cette approche peut être appliqué à n'importe quel type de canal de propagation. La puissance de transmission de chaque nœud est déterminée par la formule $P_{th}.G$ tel que :

P_{th} est le seuil de puissance nécessaire à la bonne compréhension du message. G : est la fonction calculée comme suit :

$G = Pr/P_{max}$: tel que :

P_r : est la puissance de réception du message "HELLO".

P_{max} : est la puissance maximale de transmission.

Construction d'une topologie avec des seulement arcs bidirectionnels : La topologie obtenue après construction peut contenir des liaisons unidirectionnelles, or il est préférable d'avoir une topologie avec seulement des liaisons bidirectionnelles. Il existe deux méthodes pour remédier à ce problème, la première consiste à forcer toutes les liaisons unidirectionnelles à devenir bidirectionnel. La deuxième consiste à supprimer toute liaison unidirectionnelle.

Pour ce faire, chaque nœud peut sonder chacun de ses voisins pour déterminer s'ils sont liés de manière unidirectionnelle ou non. S'ils le sont, alors le nœud soit il supprime cette liaison, soit il demande à son voisin d'ajouter l'arc inverse. La différence entre ces deux approches et que la première garde la redondance du routage alors que l'autre donne une topologie simplifiée qui est peu encombrante.

3.3.2 EDTC : Energy-aware Dynamic Topology Control algorithm

Hypothèses

-La puissance de réception est la même pour tous les nœuds. -La topologie change dynamiquement en fonction de l'énergie.

Objectifs

-Construire une nouvelle topologie conservant l'ensemble des chemins au coût minimum.
-Préservation des liens bidirectionnel.

Idée de base

L'algorithme EDTC[57] est un algorithme de contrôle de topologie distribué économe en énergie. Dans l'EDTC, en fonction de la variation énergétique des nœuds, chaque nœud ajuste dynamiquement sa puissance de transmission en fonction des informations collectées localement et ce afin d'éviter d'épuiser les nœuds faibles en énergie rapidement. L'algorithme se présente en quatre phases :

1-Définition des coûts de liaisons : Afin d'augmenter la durée de vie d'un réseau, la consommation d'énergie pour la transmission et la réception ainsi que l'énergie résiduelle en temps réel entre deux nœuds doivent être pris en considération en fonction du coût par liaison. Initialement, quand la quantité d'énergie des différents nœuds est suffisante et peuvent servir de nœuds intermédiaires, la topologie devra assurer le chemin avec la consommation énergétique la plus optimale. Cependant, quand le niveau d'énergie des nœuds diminue, il devient primordial de ne pas sur-utiliser les nœuds dont l'énergie est basse. De ce fait, l'énergie résiduelle devra avoir un poids supérieur lors du calcul du chemin. Le calcul du coût se fait comme suit :

$coût(u, v) = (p(u, v).t_T)^{x_1} (E_I(u)/E(u))^{x_2} + (P_{rev}.t_T)^{x_1} (E_I(v)/E(v))^{x_2}$ où :

t_T : est le temps de transmission des paquets de donnée.

$E_I(u), E_I(v)$: Sont la quantité d'énergie initial du nœud u et v.

$E(u), E(v)$:Sont la quantité d'énergie résiduel courante du nœud u et v .

x_1, x_2 :Sont des facteurs pondérant non-négatif.

2-Collecte d'informations locales : Dans l'algorithme EDTC, l'information requise par le nœud u dans le processus de construction de la topologie est celle de tous les nœuds dans $NS(u)$ (tel que $NS(u)$ sont les nœuds atteignables par u avec sa puissance maximale). On peut faire cela en faisant des échanges de messages "HELLO" entre les nœuds du réseau périodiquement en utilisant la puissance maximale de transmission. Supposons que le nœud u transmet HELLO(u) à P_{max} . Lors de la réception de HELLO(u), le nœud u va estimer $p(u, v)$ en comparant le RSSI¹ avec P_{max} et enregistrer cette information dans sa table de voisinage. Chaque message "HELLO" doit contenir l'identifiant du nœuds, l'énergie initial, l'énergie résiduelle ainsi que la table de voisinage de l'émetteur. De cette manière, après avoir échangé plusieurs messages avec les nœuds voisins, le nœud u aura toutes les informations nécessaires en rapport avec les nœuds voisins accessibles et peut dériver le coût de liaison coût(x, y) pour tout nœuds $x, y \in NS(u) \cup u$. En utilisant ces informations, le nœud u peut ensuite construire son sous-graphe local $G_u(V_u, E_u)$ où :

- $V_u = NS(u) \in u$.

- $E_u = (x, y) | (x, y) \in E, x, y \in V_u$.

-Le poids de (x, y) est égale au coût(x, y).

3-Construction de topologie : Le nœud u construit son arbre du plus court chemin local $T_u(V_u, E(t_u))$ en se basant sur la topologie du sous graphe G_u qui couvre tous les nœuds dans $NS(u)$. Comme tous les coûts de liaison sont positifs, les algorithmes du plus court chemin à source unique tels que l'algorithme de Dijkstra peuvent être appliqués pour atteindre la topologie voulue. Après cela, le nœud u sélectionne tout nœud à un saut de l'arbre du chemin le plus court comme voisin logique, et l'ensemble des voisins logiques de u est $NS_L(u) = \{v | (u, v) \in E(T_u), v \in V_u\}$. La relation de voisinage définie par l'algorithme n'est pas symétrique, c'est-à-dire que $v \in NS_L(u)$ n'implique pas nécessairement $u \in NS_L(v)$.

4-Ajustement de la puissance de transmission : Dans la dernière phase de l'algorithme EDTC, le nœud u ajuste sa puissance de transmission de telle sorte à ce que la consommation d'énergie soit réduite. Cependant, il existe deux approches, l'ajustement par paquet et l'ajustement périodique. Dans la première, la puissance de transmission du nœud u est fixé à la valeur minimale requise pour envoyer le paquet de données au nœud du prochain saut, cette approche bien que permettant une transmission en utilisant le minimum d'énergie est difficile d'un point de vue pratique. L'autre approche utilisé dans les algorithmes ETDC est l'ajustement périodique, le nœud u utilise une seule puissance de transmission pour communiquer avec tous ses voisins et celle-ci est ajustée périodiquement. La puissance de transmission de u est fixée en tout temps à la puissance minimale requise pour couvrir tous ses voisins logiques comme suit : $p(u) = \max\{p(u, v) | v \in NS_L(u)\}$

3.3.3 Discussions et comparaison

Après avoir étudié ces deux protocoles de conservation d'énergie basés sur le Power control, à savoir le LMST et le EDTC, nous remarquons que les deux protocoles ont leurs avantages qui se base sur la manipulation de la puissance de transmission et la réduction des liaisons entre les nœuds ainsi que leurs inconvénients tel que l'augmentation du temps de latence. Les avantages et inconvénients des deux protocoles étudiés sont résumés dans le tableau ci-dessous :

1. RSSI : est une indication du niveau de puissance reçu par la radio réceptrice après l'antenne et une éventuelle perte de câble.

| | LMST | EDTC |
|--------------|--|---|
| Avantages | -Création de la topologie une seul fois | -Équilibrage de l'énergie des nœuds |
| Inconvénient | -Surcharge des nœuds critique -Déséquilibre d'énergie de nœuds. | -Utilisation de la puissance maximale lors de l'envoi -Augmentation du temps de latence. |

TABLE 3.2: Avantages et Inconvénients des protocoles de Power Control.

3.4 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre quelques protocoles de contrôle de topologie basés sur le duty-cycling et le power control. L'objectif de ces deux approches est de diminuer la consommation d'énergie au sein d'un RCSF. Cependant, ces deux approches traitent le problème différemment. En effet, le Power Control tente de minimiser le nombre de voisins, tandis que le duty-cycling cherche à optimiser l'utilisation de l'énergie en activant les nœud dit équivalent" à tours de rôle afin de diminuer les données redondantes et minimiser la consommation énergétique. par conséquent, la combinaison entre ces deux techniques peut mener à une meilleure conservation d'énergie. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter cette technique hybride qui combine les deux techniques, à savoir le Duty Cycling et le Power Control.

Chapitre 4

Conception

4.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, l'une des contraintes majeures que rencontre un RCSF est l'énergie. De ce fait, plusieurs techniques sont utilisées pour optimiser l'utilisation de celle-ci. Parmi ces techniques nous trouvons le contrôle de topologie. Ce dernier se divise en deux approches, le Duty Cycling qui consiste à identifier la redondance des nœuds et à les grouper, puis leurs appliquer un scheduling afin de ne laisser actif qu'un nœud par groupe, et le Power Control qui consiste à ajuster la puissance de transmission selon les besoins de chaque nœud afin de minimiser sa consommation énergétique. Dans ce chapitre, nous proposons une solution qui combine les deux approches.

4.2 Idée de base et fonctionnement

Notre approche consiste à appliquer un protocole basé Duty Cycling sur chaque nœud du réseau afin de déterminer les nœuds qui seront actifs. Par la suite, ces nœuds actifs vont exécuter un protocole basé Power Control pour réduire leurs puissances de transmissions afin de minimiser l'énergie de transmission. Le protocole Power Control sera exécuté périodiquement après chaque phase d'élection des nœuds actifs. Pour se faire, nous allons dans un premier temps utiliser GECP pour identifier les nœuds redondants et les regrouper ensemble. Par la suite, un seul nœud actif sera choisi dans un groupe pour assurer le routage. Une fois la phase d'élection des nœuds actifs terminée, LMST est utilisé pour éliminer les liens redondants entre les nœuds tout en conservant la connectivité. Nous avons choisi ces deux protocoles pour leur simplicité et leurs avantages en terme du nombre de messages échangés entre les nœuds pour l'identification de la redondance des nœuds et des liens.

4.3 Modélisation du protocole GECP

Le protocole GECP fonctionne sur deux phases : la phase de formation de la liste équivalente, et la phase du choix des nœuds actifs.

4.3.1 Phase de formation de la liste équivalente

Dans cette phase, chaque nœud envoie un message sous la forme :
creation-message = "création-phase" + id-nœud + id-message + liste-voisins.
A la réception de tous les messages création en provenance de ses voisins, chaque nœud récepteur procède au calcul de la liste de ses voisins équivalents. Deux nœuds sont équivalents s'ils ont les mêmes voisins. la figure 4.1 résume le fonctionnement de cette phase.

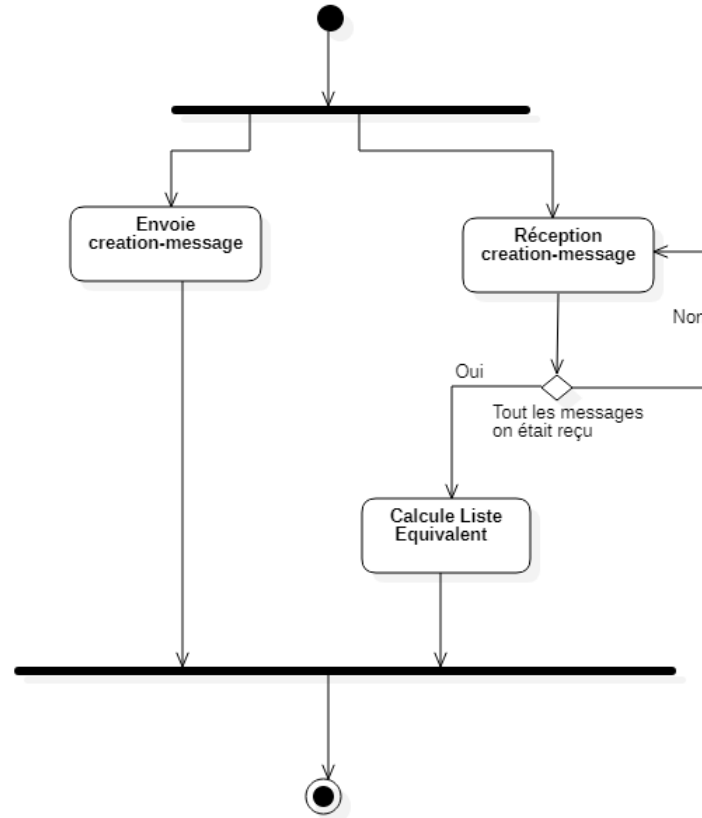


FIGURE 4.1 – Diagramme d’activité décrivant la formation de la liste équivalente.

4.3.2 Phase du choix des nœuds actifs

Après la phase de formation de la liste équivalente, tous les nœuds dans la liste équivalente est non vide passent automatiquement à l’état découverte. Si la liste équivalente du nœud est vide alors il restera à l’état actif et ne participera pas à la phase d’élection du nœud actif.

L’état découverte : C’est la phase d’élection du chef de groupe. Tous les nœuds de la même liste équivalente partagent leurs niveaux de batterie afin de déterminer le nœud le plus apte pour devenir le chef(nœud actif).

Elle contient 2 processus qui se déroulent simultanément (Figure 4.2) :

1. Le nœud envoie son message de découverte sous la forme :

Discovery-message = "discovery-send-battery-level" + id-nœud + id-message + niveau-batterie

2. Le nœud écoute tous les membres de son groupe. Dès qu’il reçoit un message de découverte, il teste : si le niveau de batterie actuel est inférieur au niveau de batterie du nœud émetteur, il va attendre la réception de Ta^1 du chef du groupe. Dès qu’il reçoit Ta , il passe à l’état sommeil. Sinon, si son énergie dépasse l’énergie de tous les nœuds membres de son groupe, alors il sera le futur chef de liste, et il envoie son Ta et il passe vers l’état actif. Sinon, le nœud reste à l’écoute des autres messages de découverte. Le message Ta est de la forme :

Ta-message = "discovery-send-Ta" + id-nœud + id-message + Ta

1. La durée pour laquelle le nœud reste à l’état actif égale à $TTL/2$ pour assurer le load balancing entre les nœuds du même groupe.

TTL (time to live) : Dépend du TTLmax et du niveau de batterie actuel du nœud.

TTLmax(time to live max) : égale à la durée de vie du premier nœud qui meurt dans la simulation sans GECP.

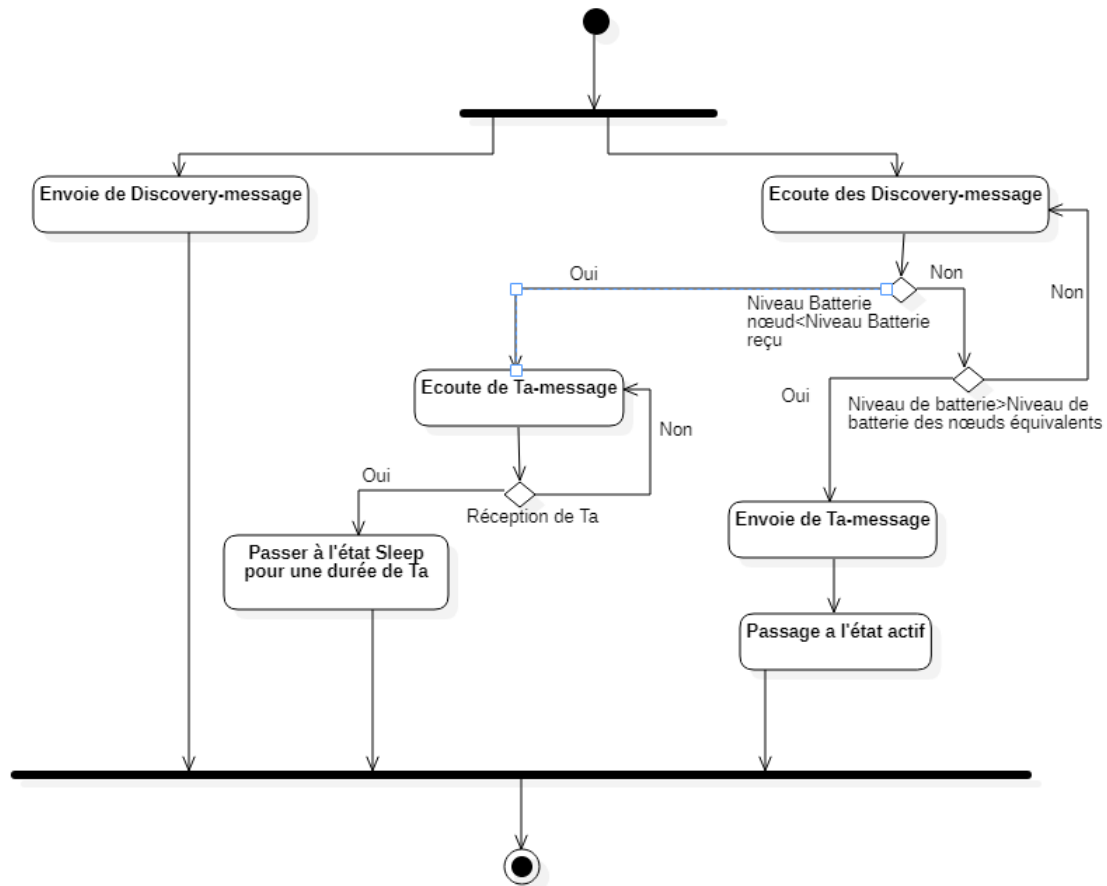


FIGURE 4.2 – Diagramme d'activité décrivant l'état découverte.

L'état actif : Le nœud actif assure le routage durant une période Ta . Il contient deux processus qui se déroulent simultanément (Figure 4.3) :

1-Chaque nœud génère un paquet chaque période prédéfinie, et l'envoi à ses voisins.

Data-message = 'data-send' + id-nœud + id-message + 'data'.

2-Chaque nœud écoute ses voisins, et dès qu'il reçoit un message il le rediffuse une seule fois seulement.

Dès que Ta expire, le nœud repasse automatiquement à l'état découverte pour élire le nouveau nœud actif tout en assurant le tache de routage.

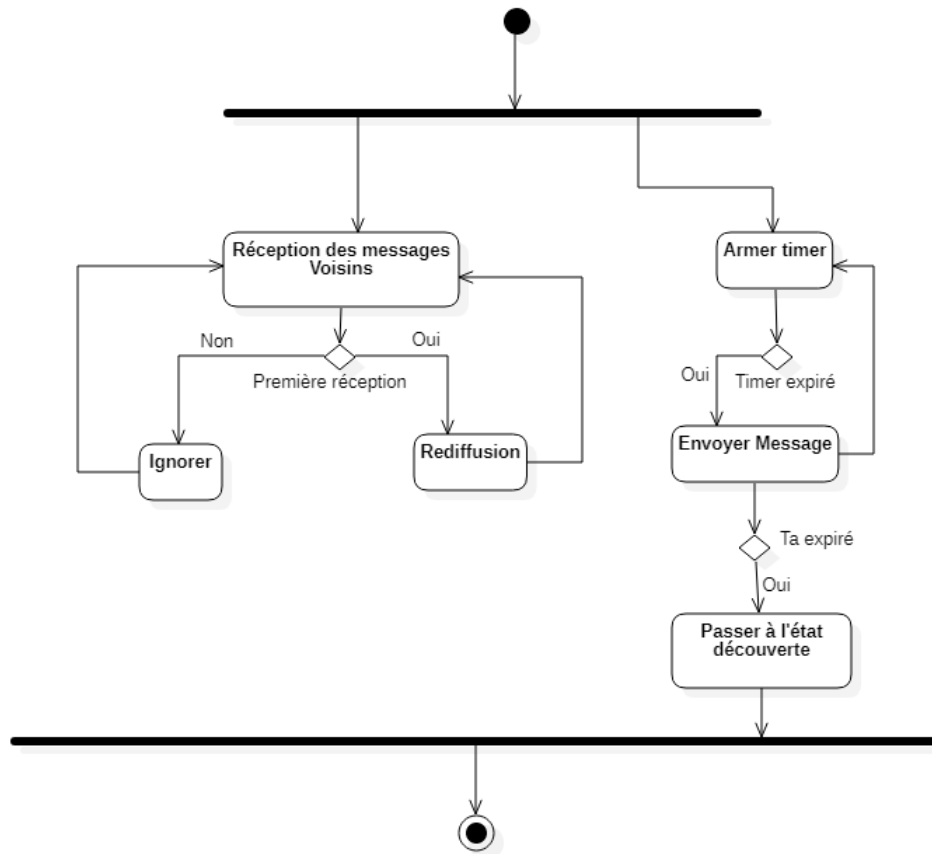


FIGURE 4.3 – Diagramme d'activité décrivant l'état actif.

L'état sommeil : Le nœud éteint son antenne de communication pour une période Ts ², ce qui veut dire qu'il ne peut recevoir ni envoyer les messages pendant la période Ts . Dès que ce dernier expire, il passe à l'état de découverte automatiquement(Figure 4.4).

2. égale à Ta pour que les nœuds se réveillent et passent à l'état de découverte simultanément avec le nœud venant de l'état actif.

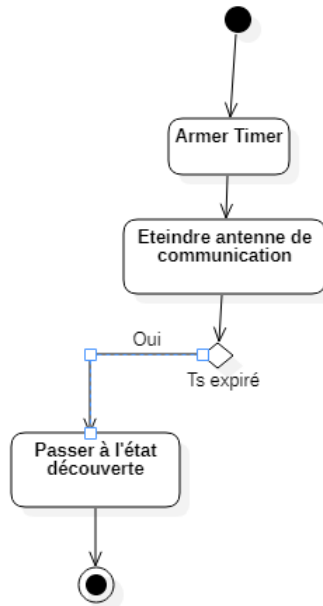


FIGURE 4.4 – Diagramme d'activité décrivant l'état sommeil.

4.4 Modélisation du protocole LMST

Le protocole LMST fonctionne sur deux phases : la phase de création du graphe réduit, et la phase d'ajustement de la puissance.

4.4.1 Phase de création du graphe réduit

Création de la liste des distances

Cette phase consiste à éliminer les liens redondants entre les nœuds voisins actifs. Pour se faire, chaque nœud actif, diffuse un message 'HELLO' de la forme :

hello-message= "hello-phase" + id-nœud + id-message + coordonnées-nœud.

A la réception de ce message, le nœud procède au calcul de la distance avec le nœud émetteur en utilisant les coordonnées reçues. En calculant toutes les distances entre un nœud et ses voisins actifs, une liste des distances sera créée. Après la construction de la liste des distances d'un nœud, ce dernier l'envoie afin d'avoir les informations à deux sauts. Autrement dit, l'échange des listes de distances entre les voisins actifs sert à construire un sous graphe à deux sauts appelé vue d'un nœud. Comme dernière étape, chaque nœud applique l'algorithme de Prime localement sur cette vue afin de construire sont MST local.

4.4.2 Phase d'Ajustement de la puissance de transmission

Dans cette phase, chaque nœud réduit sa puissance de transmission de sorte qu'il peut juste atteindre le voisin le plus proche seulement. De cette manière, l'énergie de transmission de l'émetteur sera minimisée ainsi que l'énergie de réception.

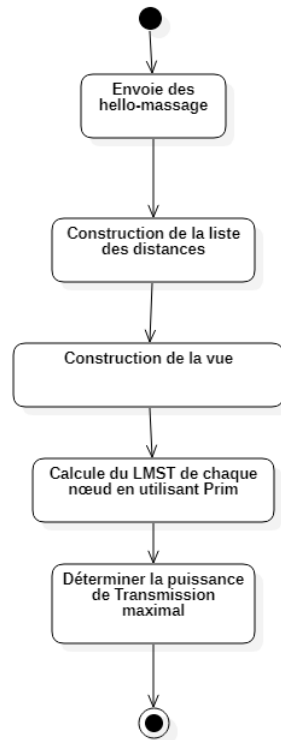


FIGURE 4.5 – Diagramme d’activité décrivant le protocole LMST.

4.5 Modélisation du protocole de la combinaison GECP/LMST

La combinaison des deux protocoles GECP et LMST consiste à appliquer dans un premier temps le protocole GECP sur le réseau de capteurs. Une fois la phase d’élection terminée et les nœuds actifs déterminés, le protocole LMST est appliqué à la nouvelle topologie constituée des nœuds actifs. Ceci implique que contrairement au protocole LMST classique où l’algorithme n’est appliqué qu’une seule fois, ici l’algorithme est appliqué périodiquement après chaque phase d’élection (Figure 4.4).

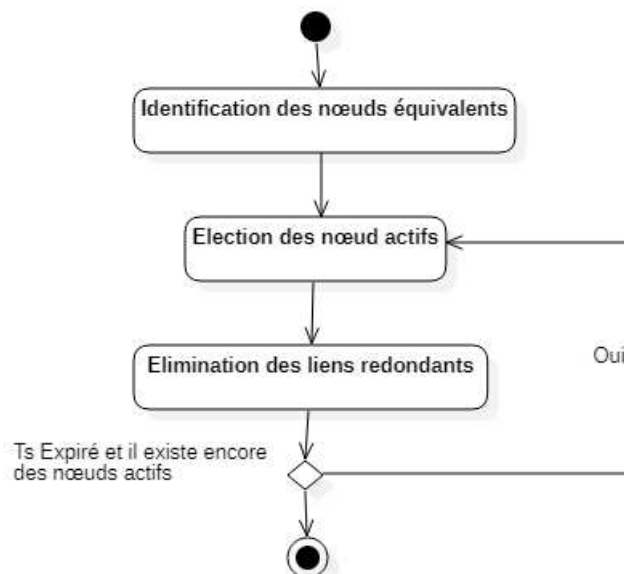


FIGURE 4.6 – Diagramme d’activité décrivant le fonctionnement de la combinaison GECP/LMST.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre solution qui consiste à combiner les deux techniques que sont le Duty Cycling et le Power Control afin de réduire la consommation d'énergie dans un RCSF. Nous avons opté pour le protocole GECP pour le duty Cycling dont le principe est de réduire le nombre de nœuds actifs et le protocole LMST pour le Power Control dont le principe est de réduire le nombre de liens. Dans le prochain chapitre, nous allons détailler l'implémentation que nous avons mis au point ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre 5

Implémentation et Résultat des simulations

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons notre implémentation ainsi que les simulations que nous avons mené, et ce afin d'évaluer les performances de l'approche que nous proposons. Nous allons commencer par décrire l'environnement de développement et de simulation. Enfin, nous allons présenter les résultats de nos simulations ainsi que leurs analyses.

5.2 Environnement de développement

Python[9] est un langage de programmation interprété, multi-paradigme et multiplateformes. Il favorise la programmation impérative structurée, fonctionnelle et orientée objet. Il est doté d'un typage dynamique fort, d'une gestion automatique de la mémoire par ramasse-miettes et d'un système de gestion d'exceptions. Il est particulièrement répandu dans le monde scientifique, et possède de nombreuses extensions destinées au calcul numérique. Les packages utilisés sont :

- **Threading** : [10] est utilisé pour exécuter plusieurs threads (tâches, appels de fonction) en même temps. Notez que cela ne signifie pas qu'ils sont exécutés sur des processeurs différents. Nous avons créé des threads à chaque besoin de simuler des événements qui se passent simultanément dans chaque nœud.
- **Socket** : [11] est un moyen de connecter deux nœuds d'un réseau pour communiquer entre eux. Un socket (nœud) écoute sur un port particulier à une adresse IP, tandis que l'autre socket attend l'autre pour établir une connexion. Le serveur forme le socket d'écoute pendant que le client attend le serveur. Nous avons utilisé les sockets UDP en multicast car nous l'avons trouvé le plus proche du fonctionnement des RCSFs, vu que l'UDP contrairement à TCP ne fait pas la vérification de réception des messages.
- **Networkx** : [12] networkx est une bibliothèque pour la création, la manipulation et l'étude des graphes et des réseaux complexes.
- **Matplotlib** : [13] matplotlib est une bibliothèque du langage de programmation Python destinée à tracer et visualiser des données sous formes de graphiques.
- **Tkinter** : [14] tkinter est un module de base intégré dans Python qui donne une interface vers le langage Tcl/Tk pour la création des interfaces graphiques.
- **Logging** : [15] est un module puissant et prêt pour l'emploi conçu pour répondre aux besoins des débutants comme des équipes d'entreprise. Il est utilisé par la plupart des bibliothèques Python tierces. Vous pouvez donc intégrer vos messages de journal à ceux de ces bibliothèques pour produire un journal homogène pour votre application.
- **Struct** : [16] est un module peut être utilisé pour traiter des données binaires stockées dans des fichiers, une base de données ou des connexions réseau, etc. Il utilise le format Strings

comme description compacte de la mise en page des structures C et de la conversion prévue en/à partir de valeurs Python.

- **Random** :[17]est un module qui peut générer des nombres aléatoires. Ce module implémente des générateurs de nombres pseudo-aléatoires pour diverses distributions.
- **Pillow** :[18][19]Python Imaging Library (ou PIL) est une bibliothèque de traitement d'images avancé pour le langage de programmation Python. Elle permet d'ouvrir, de manipuler, et de sauvegarder différents formats de fichiers graphiques.
- **pickle** :[13]pickle permet de sauvegarder dans un fichier, au format binaire, n'importe quel objet Python.

5.3 Paramètre de simulation

- Le déploiement des nœuds est aléatoire.
- La distance minimale entre deux nœuds est de 1 centimètre.
- Le nœud a une énergie initial de 5 joules.
- Le puits a une énergie illimitée.
- le modèle d'énergie est présenté comme suit :
 - Chaque envoi $\rightarrow 0.000411j$
 - Chaque réception $\rightarrow 0.000246j$
 - l'état actif $\rightarrow 0.000246j$
 - l'état sommeil $\rightarrow 0.0000001j$
 - l'état découverte $\rightarrow 0.000246j$

5.4 Interface Graphique

Pour faciliter la présentation et l'évaluation du protocole proposé, nous avons opté pour l'utilisation d'une interface graphique. Au lancement du programme, nous devons d'abord spécifier le nombre de nœuds que contiendra notre topologie aléatoire (Figure 5.1). A noter que le nombre de nœuds doit impérativement être strictement supérieur à deux.

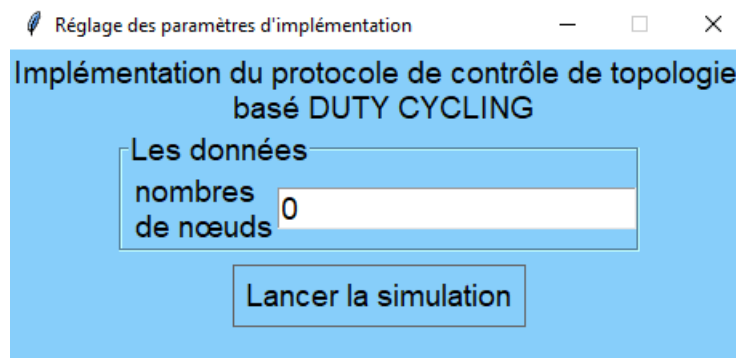


FIGURE 5.1 – Fenêtre d'accueil de l'application.

Après avoir défini le nombre de nœuds, une deuxième interface graphique s'affiche qui permet de visualiser la topologie avec et sans contrôle de topologie, ainsi que les performances en termes de consommation d'énergie ainsi que le nombre de nœuds vivants (Figure 5.2).

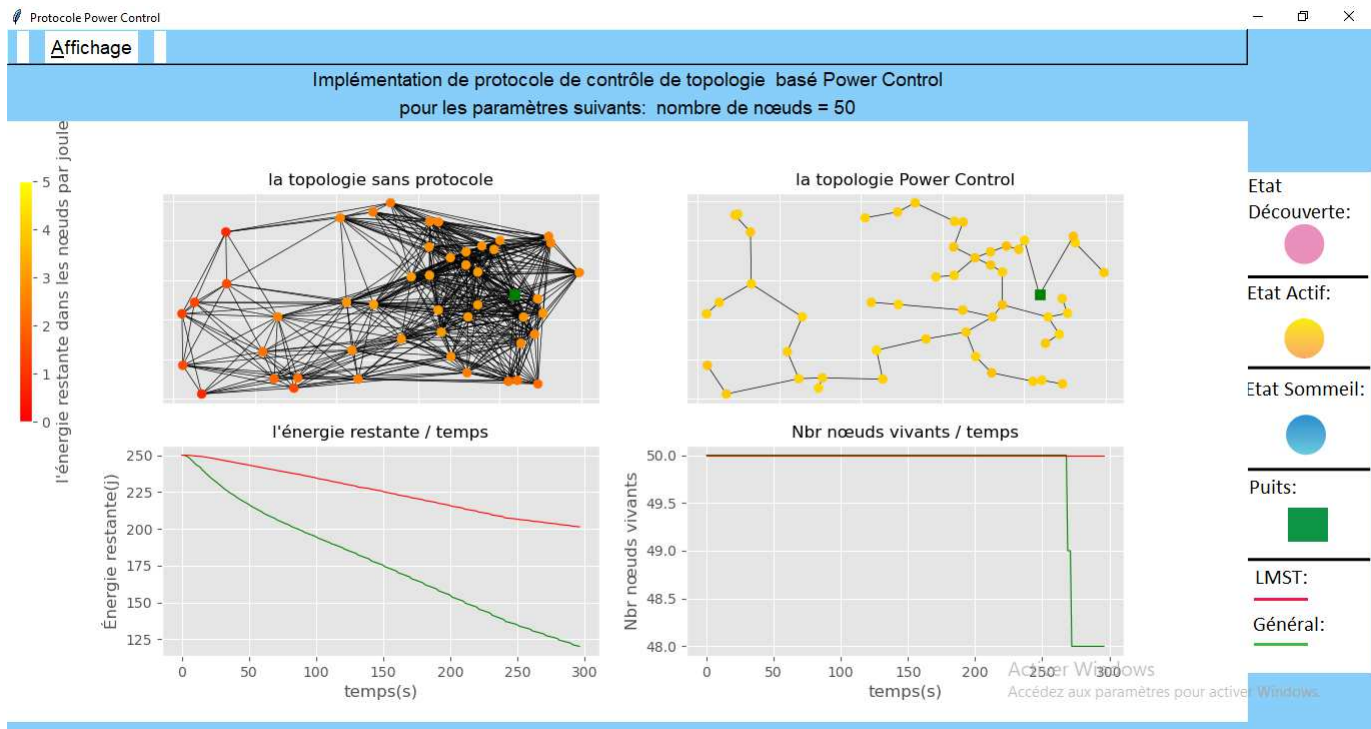


FIGURE 5.2 – Interface principale de l'application.

5.5 Résultats de simulation

Afin d'évaluer les performances de notre protocole, nous avons utilisé les métriques suivantes :

- La durée de vie du réseau calculée par rapport au nombre de nœuds vivants.
- Le taux d'énergie restante dans le réseau.
- La connectivité du réseau.

5.5.1 Résultat du Duty Cycling

Dans cette partie nous allons évaluer les performances du protocole GECP.

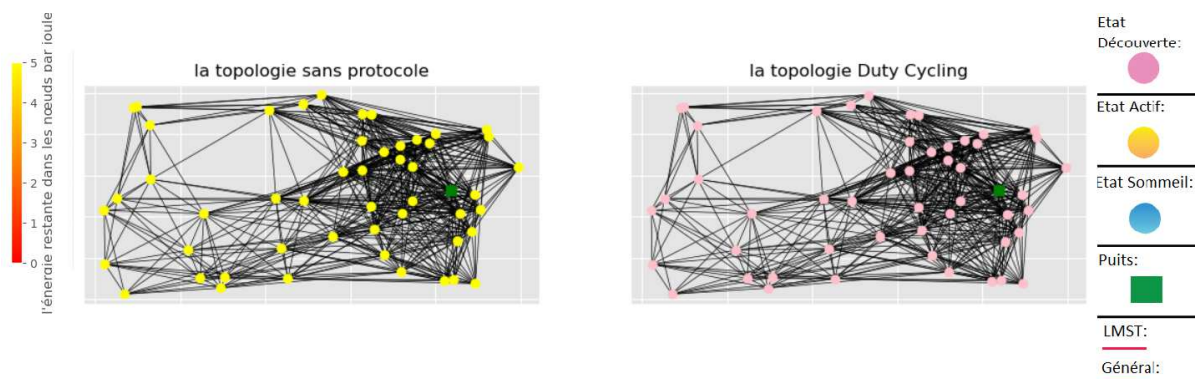


FIGURE 5.3 – Comparaison entre les deux topologie pour 50 nœuds à $T = 1200s$.

Nombre de nœuds vivants

La figure 5.4 nous donne le nombre de nœuds vivants en fonction du temps dans la topologie à 50 nœuds.

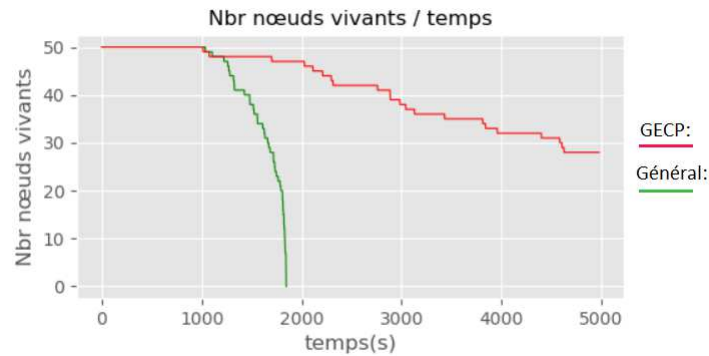


FIGURE 5.4 – Nombre de nœuds en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 5000s$.

On observe que :

- Dans la topologie sans Duty Cycling, on remarque que le nombre de nœuds diminue très tôt et très vite. En effet, le premier nœud meurt à $T = 600s$ et le nombre de nœuds continue à baisser dans un rythme plus ou moins régulier jusqu'à ce qu'il n'en reste plus au bout de $T = 1710s$. Cela est dû au fait que tous les nœuds participent au routage ainsi que le fait qu'ils soient tous actifs en même temps.
- Dans la topologie avec Duty Cycling, on remarque que le nombre de nœuds ne commence à diminuer qu'à $T = 1012s$ et continue de diminuer mais à un rythme beaucoup moins soutenu que dans la topologie sans contrôle, à $T = 1710s$ il restait toujours 47 nœuds actifs alors que tous les nœuds de la topologie sans contrôle étaient déjà morts à cet instant, et même après 5000s, il restait encore 28 nœuds opérationnels dans la topologie.

Taux d'énergie restante

La figure 5.5 donne le taux d'énergie restante en fonction du temps pour une topologie à 50 nœuds.

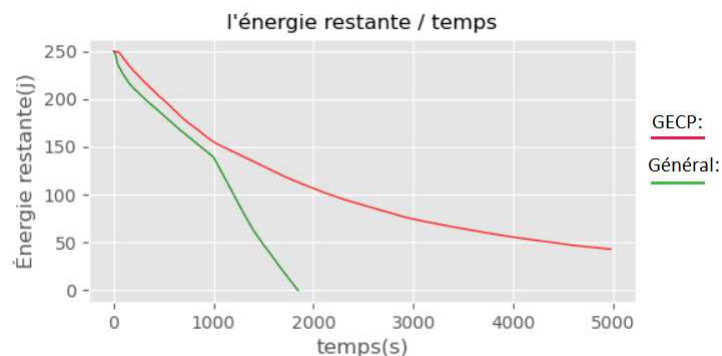


FIGURE 5.5 – Taux d'énergie restant en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 5000s$.

- Dans la topologie sans Duty Cycling, on constate que sans aucun contrôle de topologie, le taux d'énergie dans le réseau est en chute libre, le réseau n'a duré que $T = 1710s$. Cela est notamment dû au nombre important de messages échangés entre les nœuds qui sont tous actifs dans le réseau.

- Dans la topologie avec Duty Cycling, on remarque que le taux d'énergie dans le réseau diminue plus lentement que le taux d'énergie du graphe sans contrôle, là où le réseau sans contrôle de topologie avait cessé de fonctionner au bout de $T = 1710s$, la topologie avec Duty Cycling elle continue à fonctionner même au bout de $T = 5000s$. En effet, à $T = 5000s$ le taux d'énergie dans le réseau avec Duty Cycling est égale à $E = 42j$. Cela est dû au scheduling appliqué à la topologie qui fait que seuls les nœuds actifs envoient des messages, ce qui fait que moins de messages sont envoyés et reçus et que moins d'énergie est consommée.

Connectivité du réseau

Les figures 5.6, 5.7 et 5.8 montrent la topologie à 50 nœuds à différents instants de la durée de vie de la topologie avec et sans utilisation du Duty Cycling.

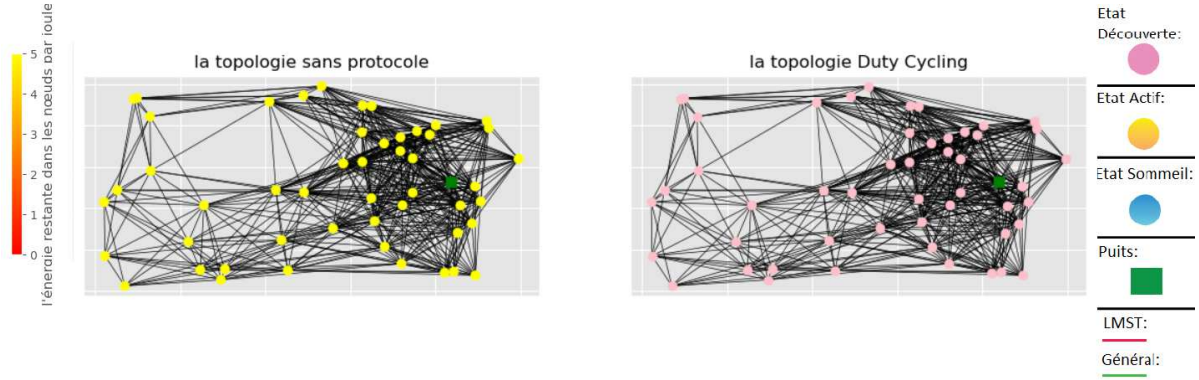


FIGURE 5.6 – Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 100s$.

On remarque que dans une topologie Duty Cycling, lors de la première phase de découverte la topologie est similaire à la topologie sans Duty Cycling (Figure 5.6).

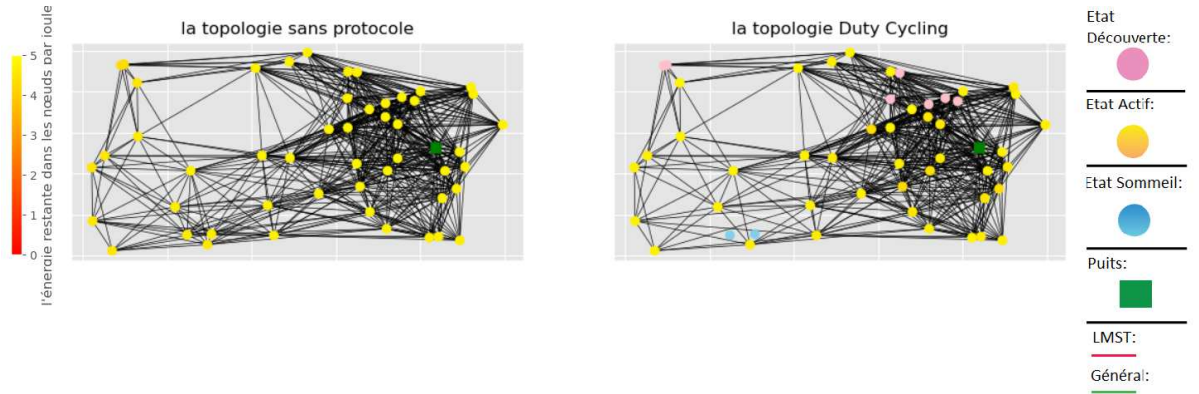


FIGURE 5.7 – Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 300s$.

D'après la figure 5.7, on constate qu'après la fin des phases découverte et élection, la topologie engendrée est réduite par rapport à celle sans contrôle de topologie sans pour autant perdre en connectivité. Cela est dû au fait que plusieurs nœuds sont à l'état Sommeil.

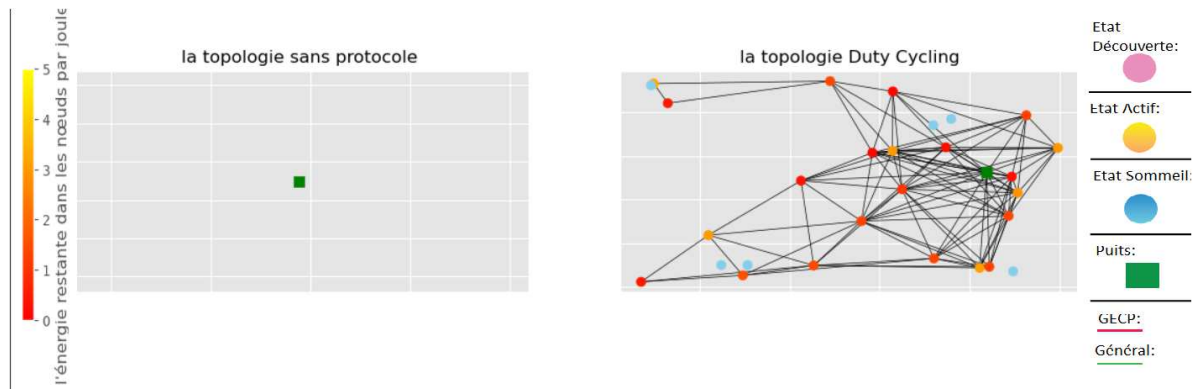


FIGURE 5.8 – comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 5000s$.

Enfin, d'après la figure 5.8, on observe que même si le nombre de nœuds a fortement diminué, la connectivité reste néanmoins quand même assurée. Cela est dû à la technique de scheduling utilisée (Duty cycling).

Conclusion

On en conclue d'après ses résultats que le protocole GECP basé Duty Cycling est un bon protocole en terme d'économisation d'énergie de chaque nœud individuellement et collectivement. Son problème majeur est la perte de messages lors de la phase d'élection

5.5.2 Résultat du Power Control

Dans cette partie nous allons évaluer les performances du protocole LMST

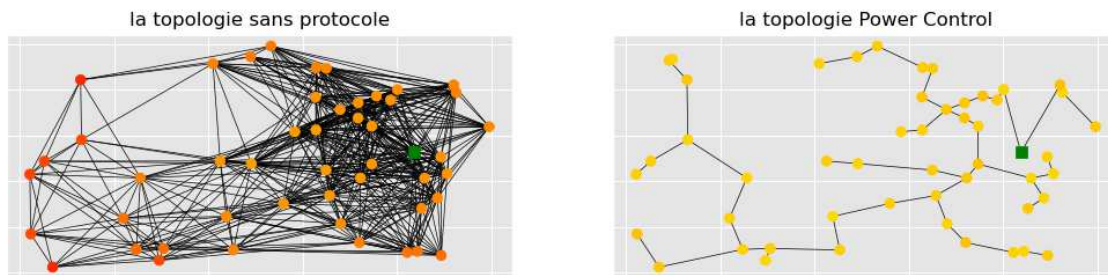


FIGURE 5.9 – Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds.

Nombre de nœuds vivants

La figure 5.10 nous donne le nombre de nœuds vivants en fonction du temps dans la topologie à 50 nœuds.

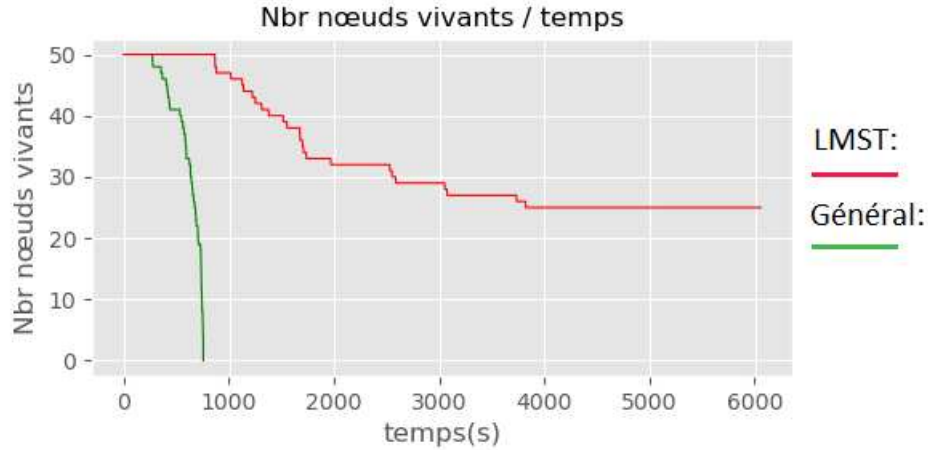


FIGURE 5.10 – Nombre de nœuds en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds $T = 6000s$.

On constate que :

- Dans la topologie sans Power Control, le nombre de nœuds diminue très tôt et très vite. En effet, le premier nœud meurt à $T = 293s$ et le nombre de nœuds continue à baisser dans un rythme plus ou moins régulier jusqu'à ce qu'il n'en reste plus au bout de $T = 800s$. Ceci est aussi dû au fait au nombre important de messages échangés entre les nœuds qui sont tous actifs dans le réseau.
- Dans la topologie avec Power Control, le nombre de nœuds ne commence à diminuer qu'à $T = 811s$ et continue de diminuer mais à un rythme beaucoup moins soutenu que dans la topologie sans contrôle alors que celle-ci n'a déjà plus de nœuds opérationnels, à $T = 6000s$ il restait toujours 18 nœuds actifs alors que dans la topologie avec Power Control que tous les nœuds de la topologie sans contrôle étaient déjà morts à cet instant.

Taux d'énergie restante

La figure 5.11 donne le taux d'énergie restantes en fonction du temps pour une topologie à 50 nœuds.

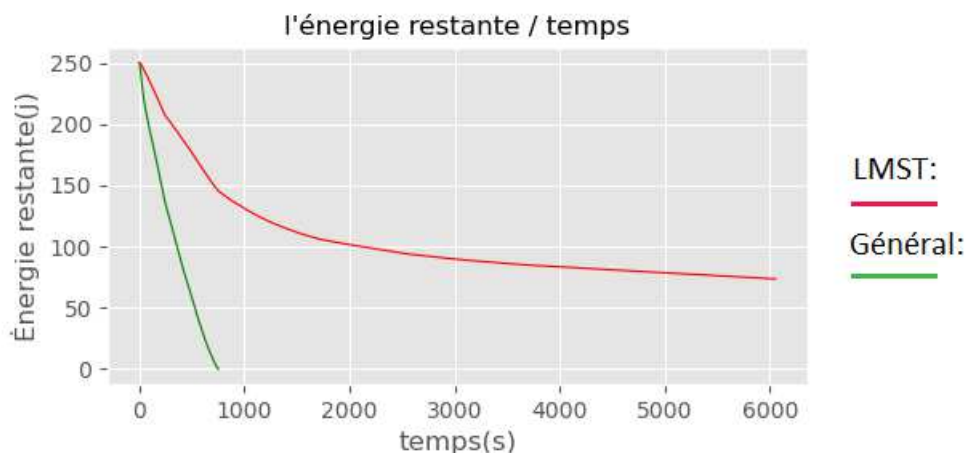


FIGURE 5.11 – Taux d'énergie restant en fonction du temps pour une topologie de 50 nœuds à $T = 6000s$.

On remarque que :

- Dans la topologie sans Power Control, le taux d'énergie dans le réseau est en chute libre, le réseau n'a duré que $T = 800s$. Cela est notamment dû au nombre important de messages échangés entre les nœuds qui sont tous actifs dans le réseau.
- Dans la topologie avec Power Control, le taux d'énergie dans le réseau diminue plus lentement que le taux d'énergie du graphe sans contrôle, là où le réseau sans contrôle de topologie avait cessé de fonctionner au bout de $T = 800s$, la topologie avec Power Control elle continue à fonctionner même au bout de $T = 6000s$.

Connectivité du réseau

Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 montrent la topologie à 50 nœuds à différents instants de la durée de vie de la topologie avec et sans utilisation du Power Control.

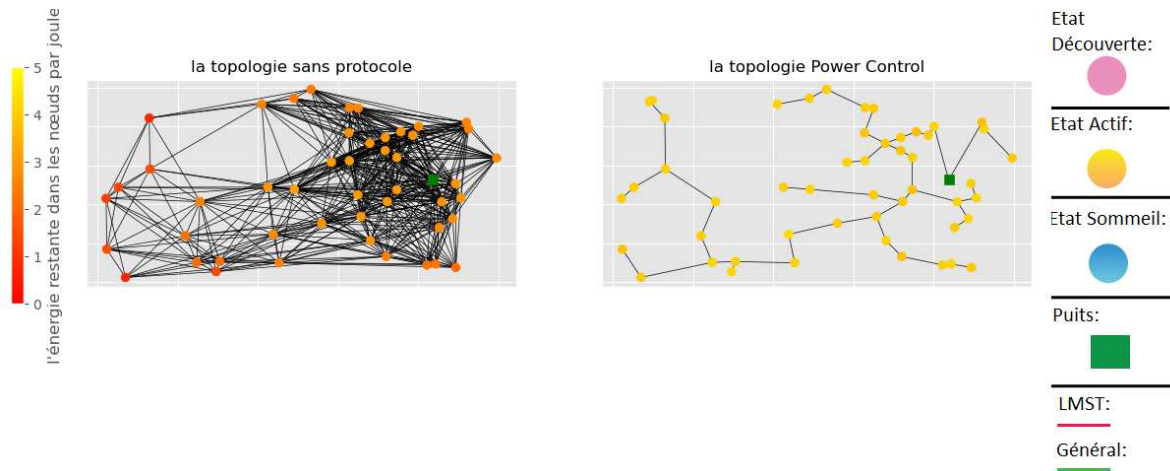


FIGURE 5.12 – Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 300s$.

Après la phase découverte, On constate la création d'une topologie réduite (Figure 5.12),

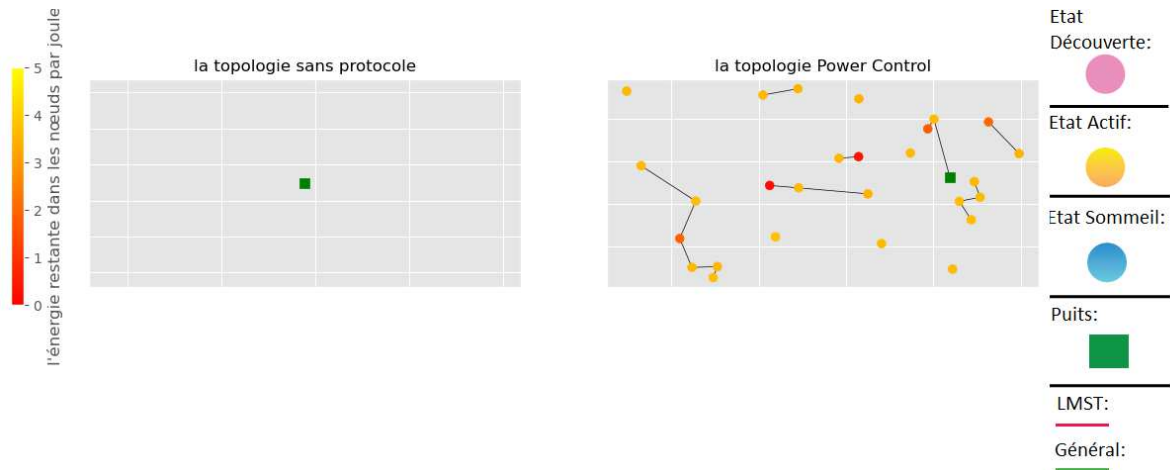


FIGURE 5.13 – Comparaison entre les deux topologies pour 50 nœuds à $T = 3500s$.

Après une durée de temps $T = 3500s$ on remarque une grande baisse au niveau de la connectivité du réseau sous protocole LMST (Figure 5.13), dû au fait que tous les nœuds étaient actifs et participent au routage.

Conclusion

D'après les résultats obtenus, le protocole de contrôle de puissance LMST est un bon protocole en terme d'économisation d'énergie de chaque nœud individuellement. Son problème majeur réside dans le fait qu'il crée un déséquilibre de charge dans le réseau ce qui impacte la connectivité suite à l'épuisement de la batterie des nœuds critiques. Une manière d'améliorer ce protocole est de le rendre plus dynamique en recalculant l'arbre couvrant minimum lors de la détection de trous de connectivité, ou bien à intervalle régulier comme dans le WDTC.

5.5.3 Résultat de la combinaison Duty Cycling/Power Control

Compte tenu des circonstances particulière de cette année universitaire, nous n'avons malheureusement pas pu finaliser l'implémentation de notre solution. Par conséquent, nous n'avons pas atteint l'étape de la représentation des résultats après la combinaison Duty Cycling/Power Control

5.6 Conclusion

D'après les résultats obtenus, les protocole de Duty Cycling et de Power Control sont tous les deux de bon protocoles en terme d'économisation d'énergie et permettent d'augmenter considérablement la durée de vie d'un réseau.

Conclusion Général

Les réseaux de capteurs sans fil ont connu une grande évolution et attiré de nombreux domaines (militaire, médical, scientifique, ...etc.) grâce à leurs fonctionnalités. L'objectif principal de ces réseaux est la collecte, le traitement et la transmission de données de manière autonome. Cependant, la conception de ces réseaux doit satisfaire certaines contraintes. Parmi ces contraintes, l'énergie est devenu un défis majeur à surmonter dans cette nouvelle technologie. Plusieurs technique de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature dont le Duty Cycling et le Power Control.

Dans ce travail, nous avons commencé par présenter un état de l'art sur les réseaux de capteurs. Ensuite, nous avons présenté quelques techniques de conservation d'énergie. Enfin, nous avons présenté quelques algorithmes basé Duty Cycling et Power Control puis présenté notre solution qui consiste à combiner les deux approches.

Pour finir, nous sommes passés à l'implémentation de la solution proposée et à l'évaluation de ses performances en termes d'énergie restante et de nœuds vivants en fonction du temps. D'après les résultats obtenu dans l'implémentation, en comparant les résultats du Duty Cycling et de Power Control avec une topologie sans contrôle, nous avons constaté une nette amélioration et prolongation de la durée de vie de réseaux. Néanmoins, nous n'avons pas pu finaliser l'implémentation de la combinaison Duty Cycling et Power Control. Donc, comme perspective, nous proposons de terminer cette intégration afin de voir le gain potentiel en terme de conservation d'énergie si cette solution est implémentée à 100%.

Bibliographie

- [1] URL : <https://www.digora.com/fr/blog/definition-iot-et-strategie-iot>.
- [2] URL : <https://www.dataversity.net/brief-history-internet-things/>.
- [3] URL : <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>.
- [4] URL : <https://www.digora.com/fr/blog/quest-ce-que-liot-et-pourquoi-mener-une-strategie-diot>.
- [5] URL : https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_33.html.
- [6] URL : <https://technologiecollegejulesferrynarbonne.cabanova.com/files/downloads/18.-principe-de-fonctionnement-d-un-capteur.pdf>.
- [7] URL : http://contiki.sourceforge.net/docs/2.6/index.html?fbclid=IwAR0c820N10ccC-q0BBcAJYU6dU2kYpI_SF2N15azB5lnZesBCMpbN0Y4htg.
- [8] URL : <https://www.huawei.com/minisite/liteos>.
- [9] URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Python_\(langage\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Python_(langage)).
- [10] URL : <https://docs.python.org/3/library/threading.html>.
- [11] URL : <https://www.geeksforgeeks.org/socket-programming-python/>.
- [12] URL : <https://networkx.org/>.
- [13] URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Matplotlib>.
- [14] URL : <http://www.tcl.tk/>.
- [15] URL : <https://realpython.com/python-logging/>.
- [16] URL : <https://www.journaldev.com/17401/python-struct-pack-unpack>.
- [17] URL : <https://docs.python.org/3/library/random.html>.
- [18] URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Python_Imaging_Library.
- [19] URL : <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>.
- [20] H. ABRACH et al. "MANTIS : system support for multimodal NeTworks of in-situ sensors." In : jan. 2003, p. 50-59.
- [21] I.F. AKYILDIZ et al. "A survey on sensor networks". In : *IEEE Communications Magazine* 40.8 (2002), p. 102-114. DOI : 10.1109/MCOM.2002.1024422.
- [22] Ian AKYILDIZ et al. "Wireless Sensor Networks : A Survey". In : *Computer Networks* 38 (mars 2002), p. 393-422. DOI : 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [23] Mme SARI Mounya AMAL. "ETUDE DU RSSI POUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL". Mém. de mast. Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen Faculté des Sciences Département d'Informatique, 2017.
- [24] Awatef BEN, Nasri NEJAH et Abdennaceur KACHOURI. "Contributions à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". Thèse de doct. Jan. 2013. DOI : 10.13140/RG.2.2.25510.47688.

- [25] Melle. Amira BENTABET M. Slimane Charafeddine BENGHELIMA. “L’optimisation du déploiement d’un RCSF pour une application de surveillance de sites”. Thèse de doct. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib D’Ain Témouchent Institut des Sciences Département des Mathématiques et de l’Informatique, 2019.
- [26] Mehdi BOUALLEGUE. “Protocoles de communication et optimisation de l’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”. Theses. Université du Maine, mars 2016. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01400679>.
- [27] Abdelmalek BOUDRIES. “Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil”. Thèse de doct. Université Ferhat Abbas de Sétif 1 Faculté des Sciences, 2014.
- [28] Manuel CAMUS. “Architecture de réception RF très faible coût et très faible puissance. Application aux réseaux de capteurs et au standard Zigbee”. Theses. Université Paul Sabatier - Toulouse III, jan. 2008. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00309926>.
- [29] Alberto CERPA et Deborah ESTRIN. “ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies”. Center for Embedded Networked Sensing, University of California, Los Angeles (UCLA), 2007.
- [30] Benjie CHEN et al. “Span : An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks”. In : *Wireless Networks* (2002).
- [31] Catalogue Phoenix CONTACT. “INDUSTRIAL Wireless Communication sans fil du capteur jusqu’au réseau”. 2012.
- [32] Nathalie DESSART et al. “Distributed decision for medical alerts using wireless sensors.” In : *10th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WOWMOM 2009*. KOS, Greece, juin 2009, p. 1-6. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00519589>.
- [33] Yong DING, Chen WANG et Li XIAO. “An Adaptive Partitioning Scheme for Sleep Scheduling and Topology Control in Wireless Sensor Networks”. In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 20.9 (2009), p. 1352-1365. DOI : 10.1109/TPDS.2008.230.
- [34] Ahmed HABBANI et al. “Réseaux de capteurs : Système d’acquisition et de routage d’information”. In : *Electronic Journal of Information Technology* (avr. 2006).
- [35] Chalermek INTANAGONWIWAT, Ramesh GOVINDAN et Deborah ESTRIN. “Directed Diffusion : A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks”. In : *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. MobiCom ’00. Boston, Massachusetts, USA : Association for Computing Machinery, 2000, p. 56-67. ISBN : 1581131976. DOI : 10.1145/345910.345920. URL : <https://doi.org/10.1145/345910.345920>.
- [36] R. KACIMI. “Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fil”. Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [37] Messaoud KARA. “Réseau de capteurs sans fil : étude en vue de la réalisation d’un récepteur GPS différentiel à faible coût”. Theses. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, nov. 2009. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00724810>.
- [38] BENHADDOUCHE Wiam KAZI TANI CHAHRAZAD. “Implémentation et test d’un protocole de prévention de l’attaque Clone dans un réseau de capteurs sans fil”. Mémoire de fin d’études pour l’obtention du diplôme de Master en Informatique. Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen Faculté des Sciences Département d’Informatique, 2014.
- [39] Cheick-Tidjane KONE. “Conception de l’architecture d’un réseau de capteurs sans fil de grande dimension”. Theses. Université Henri Poincaré - Nancy I, oct. 2011. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00650839>.

- [40] Lakshman KRISHNAMURTHY et al. "Design and deployment of industrial sensor networks : experiences from a semiconductor plant and the north sea". In : *In SenSys '05 : Proceedings of the 3rd international*. ACM Press, 2005, p. 64-75.
- [41] Dilip KUMAR, Trilok C. ASERI et R.B. PATEL. "EEHC : Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks". In : *Computer Communications* 32.4 (2009), p. 662-667. ISSN : 0140-3664. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2008.11.025>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366408006087>.
- [42] Mohamed LEHSAINI. "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique". 2009BESA2014. Thèse de doct. University of Franche-Comté, 2009, 1 vol. (188 p.), ill., 30 cm. URL : <http://www.theses.fr/2009BESA2014>.
- [43] Ning LI, J. HOU et L. SHA. "Design and analysis of an MST-based topology control algorithm". In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4 (2005), p. 1195-1206.
- [44] Kais MEKKI et al. "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment". In : *ICT Express* 5.1 (mars 2019), p. 1-7. DOI : 10.1016/j.ict.2017.12.005. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01670379>.
- [45] ZIANI Djamila MERABET SIHAM. "Etude et simulation des techniques de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs". thèse. Université A.B Tlemcen, 2013.
- [46] Hadjer MESSABIH. "SN-CAS : Contribution des réseaux de capteurs à la conscience des contextes des systèmes". Thèse de doct. Université HADJ LAKHDAR – BATNA Faculté des sciences Département d'Informatique.
- [47] S. NIKOLIDAKIS et al. "Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks Through Balanced Clustering". In : *Algorithms* 6 (2013), p. 29-42.
- [48] Keyur PATEL et Sunil M PATEL. "Internet of Things-IOT : Definition , Characteristics , Architecture , Enabling Technologies , Application & Future Challenges". In : 2016.
- [49] E.M. PETRIU et al. "Sensor-based information appliances". In : *IEEE Instrumentation Measurement Magazine* 3.4 (2000), p. 31-35. DOI : 10.1109/5289.887458.
- [50] G.Le Grand R.MERAIHI. "Contrôle de topologie oriente stratégie base sur des routeurs mobiles dédiés / Strategy oriented topology control based on mobile dedicated routers". type. GET/Telecom Paris (ENST)- LTCI-UMR 5141 CNRS, 2002.
- [51] Zahra REZAEI. "Energy Saving in Wireless Sensor Networks". In : *International Journal of Computer Science & Engineering Survey* 3 (fév. 2012), p. 23-37. DOI : 10.5121/ijcses.2012.3103.
- [52] Yasser ROMDHANE. "Evaluation des performances des protocoles SMAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs". Projet de fin d'études. Ecole Supérieure des Communications de Tunis (Sup'Com), 2006-2007.
- [53] Sinchan ROYCHOWDHURY et Chiranjib PATRA. "Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing Geographic Adaptive Fidelity and Geographic Energy Aware Routing in Ad Hoc Routing". In : *Special Issue of IJCCT* 1 (jan. 2010). DOI : 10.47893/IJCCT.2011.1077.
- [54] Debashis SAHA et Arunava DALAL. "Topology Control in Wireless Sensor Networks : Protocols and Algorithms". In : jan. 2007, p. 43. ISBN : ISBN 978-3-540-37366-7.
- [55] Ludovic SAMPER. "Modélisations et analyses de réseaux de capteurs". Cette thèse a été préparée dans le cadre d'un financement CIFRE avec France Telecom R&D Meylan. Theses. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, avr. 2008. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00283716>.

- [56] Eduardo SOUTO et al. "Sampling Energy Consumption in Wireless Sensor Networks". In : *IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC 2006), 5-7 June 2006, Taichung, Taiwan*. IEEE Computer Society, 2006, p. 284-287. DOI : 10.1109/SUTC.2006.118. URL : <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/SUTC.2006.118>.
- [57] Ye TIAN et al. "Energy-Aware Dynamic Topology Control Algorithm for Wireless Ad Hoc Networks". In : *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*. 2008, p. 1-5. DOI : 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.48.
- [58] GONZALEZ Andres et BARROUX Mickael XUE YONG AGUILAR Andres. "Agrégation de données dans les réseaux de capteurs". thèse. Université de Technologie Compiègne, 2010.
- [59] Yaser YOUSEF. "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil". Theses. Université de Haute Alsace - Mulhouse, juill. 2010. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00590407>.
- [60] Bahia ZEBBANE, Manel CHENAIT et Nadjib BADACHE. "A Group-Based Energy-Saving Algorithm for Sleep/Wake Scheduling and Topology Control in Wireless Sensor Networks". In : *Wirel. Pers. Commun.* 84.2 (sept. 2015), p. 959-983.