République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master en informatique

Option: Réseaux et Système Distribués (R.S.D)

Thème

Amélioration des performances du protocole de routage RPL

Réalisé par :

- **Mlle KEBIR Bahia**
- **Mlle RAHMOUNI Samia**

Soutenue le 04 juillet 2017 devant le jury composé de MM.

- *Mr. BENMAMMAR Badr* *(Président)*
- *Mr. LEHSAINI Mohamed* *(Encadrant)*
- *Mr. BEKARA Chakib* *(Examinateur)*

Année universitaire : 2016-2017

Remerciements

Nous remercions ALLAH de nous avoir données la santé et le courage afin de pouvoir réussir ce travail.

Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours du quel nous avons bénéficié l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui nous tenons à dire profondément et sincèrement merci.

Nous exprimons notre grande gratitude à notre professeur encadrant « Mr Lehsaini Mohamed », d'avoir accepté de suivre notre travail et pour ses précieux conseils et ses orientations.

Nous avons eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs, votre sérieux, votre compétence.

Un grand merci aux membres de jury d'avoir accepter de juger notre modeste travail.

Nous remercions toutes les personnes surtout Mlle « Bouzebiba Hadjer», d'une quelconque manière, nous ont apporté leur amitié, leur attention, leurs encouragements, leur appui et leur assistance pour que nous puissions mener à terme ce travail.

Nos remerciements vont également à nos parents qui nous ont encouragés, qui nous ont appris à travailler honnêtement et qui ont toujours supporté moralement et financièrement pendant toutes nos longues années d'études.

MERCI

Dédicaces

A mes chers parents symbole de sacrifice, de tendresse, qui m'ont a éclairée mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenue toute au long de mes études.

A mes frères Mostefa et Abdou El Ilah et ma sœur Nouria qui je vous souhaite beaucoup de joie, de réussites et de bonheur dans la vie.

Sans oublier ma nièce Rahima Nour el Houda ma petite Ange et mon neveu Mohammed El Habibe.

A tous les membres de ma famille, petits et grands, mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines.

A tous mes camarades et mes amies … Merci pour tous ces moments qu'on avait vécus ensemble.

A mon binôme Rahmouni Samia

A tous ceux qui m'aiment & que j'aime.

Kebir Bahia Wahiba

Dédicaces

Je dédie avec respect ce modeste travail fruit de plusieurs années de réflexion à tout des qui ont inspiré aimé et aidé de proche ou de loin

Mon père qui ma prête attention et qui a fait de moi ce que je suis maintenant.

Ma très chère mère qui ma offert depuis toujours le plus belle cadeau de l'univers, le cœur d'une mère et à qui je serais éternellement reconnaissant pour son aide moral et son soutient matériel et affectif.

A ma grand frère Abdelhak qui je souhaite beaucoup de joie et de bonheur dans sa vie.

A ma petit frère Mouad et ma petite sœur Ammaria qui je souhaite la réussite dans ces études.

A ma tante Hanifa qui je souhaite une belle vie pleine de joie et de bonheur.

A tous les membres de ma famille, petits et grands, mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines.

A tous mes amies et mes camarades … Merci pour tous ces moments qu'on avait vécus ensemble

A mon binôme Kebir Bahia Wahiba

A La Fin tous simplement je vous dites « J'aime Beaucoup »

Rahmouni Samia

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I Les réseaux de capteurs sans fil 4

I.1 Introduction 4

I.2 Les réseaux de capteurs sans fil 4

I.2.1 Description d'un capteur 4

I.2.2 Les composants d'un capteur sans fil 5

I.3 Domaines d'applications des réseaux de capteurs 5

I.3.1 Applications militaires 6

I.3.2 Application à la surveillance 6

I.3.3 Application environnementale 6

I.3.4 Applications médicales 7

I.3.5 La domotique 7

I.3.6 Applications commerciales 8

I.3.7 Applications dans le domaine sportif 9

I.4 Architecture des RCSF 9

I.4.1 Suite à la demande 10

I.4.2 Suite à un événement 10

I.5 Facteurs et contraintes des RCSF 11

I.6 Conclusion 12

Chapitre II Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil 14

II.1 Introduction 14

II.2 Routage dans les RCSF 14

II.2.1 Les types de cardinalité de la communication 14

II.2.2 Contraintes de routage dans les RCSF 15

II.3 Classification des protocoles de routage 15

II.3.1 Topologie du réseau 15

a) Topologie plate 16

b) Topologie hiérarchique 16

II.3.2 Manière d'établissement des routes 16

a) Protocoles proactifs 16

b) Protocoles réactifs 17

c) Protocoles hybrides 17

II.4 Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF 17
II.5 Conclusion 18
Chapitre III Le protocole de routage RPL 20
III.1 Introduction 20
III.2 RPL (Routing Protocol for Low power and lossy networks-LLNS) 20
III.2.1 Messages du protocole RPL 21
III.2.2 Construction du DODAG 22
III.2.3 Trafics supportés par le DODAG 23
III.3 Conclusion 24
Chapitre IV Améliorations des performances de RPL 26
IV.1 Introduction 26
IV.2 Outils de la simulation 26
IV.2.1 Contiki 26
a) Architecture 26
b) Connectivité 27
IV.2.2 Simulateur Cooja 28
IV.2.3 Environnement de développement 29
IV.3 Evaluation de RPL 29
IV.3.1 Métriques de la simulation 30
IV.3.2 Evaluation selon différentes métriques de routage 31
a) Evaluation d'ETX 31
b) Evaluation d'énergie 31
IV.3.3 Résultats et Discussion 31
IV.4 Amélioration proposée 33
IV.4.1 Démarche à suivre 33
IV.4.2 Résultats et Discussion après l'amélioration 35
IV.5 Conclusion 36
Conclusion générale et perspectives 38
Références 40
Liste des figures 41
Liste des tableaux 41

Introduction générale

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil sont aujourd'hui utilisés dans notre quotidien dans diverses applications notamment les applications domotiques. L'avantage d'une telle utilisation reste le coût faible d'installation et de maintenance d'un système de réseaux de capteurs sans fil. Par ailleurs, au-delà de son faible coût, un réseau de capteurs sans fil répond à un ensemble de critères qui favorisent son utilisation de plus en plus fréquente pour la surveillance et la commande de systèmes à savoir son observabilité et la facilité de son déploiement. Par exemple, les capteurs peuvent être largués par un avion pour le contrôle d'une zone d'intérêt.

Néanmoins, l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil pour certaines applications peut être inadaptée à cause de la durée de vie limitée de la batterie des nœuds qui composent le réseau. Il est donc nécessaire de maximiser cette durée de vie tout en respectant les exigences de qualité de service pour étendre le domaine d'application des réseaux de capteurs sans fil.

Comme tout système reposant sur les communications en particulier les communications sans fil, plusieurs types de messages sont échangés à travers ce réseau pour établir des chemins entre deux communicants. L'acheminement de l'information dans un tel réseau ne peut être assuré que grâce à un protocole de routage et ce dernier doit garantir la fiabilité de livraison de données.

A cet effet, au niveau réseau, plusieurs protocoles ont été proposés dans la littérature pour effectuer du routage dans les réseaux de capteurs sans fil où on a un ensemble de contraintes de ressources telles que la puissance de calcul, la taille de la mémoire, la quantité d'énergie stockée et la bande passante de communication. Pour acheminer un paquet jusqu'à sa destination, la plupart des protocoles de routage utilisent comme prochain saut un nœud voisin spécifique en se basant sur une métrique de routage, parmi ces protocoles le protocole RPL (Routing Protocol for Low power and Lossy Networks : LLNS) [1]. Ce protocole de routage est utilisé même dans des applications de la famille de l'internet des objets qui se caractérisent d'une part par un système d'adressage basé sur IPv6 et d'autre part ces applications supportent l'hétérogénéité des nœuds capteurs en particulier.

L'objectif principal de notre projet de fin d'étude, est de faire une évaluation des performances du protocole RPL selon deux métriques de routage : ETX[1] et consommation

[1] ETX : Expected Transmission Count

d'énergie. La première tient compte de la qualité de lien et à cet effet les nœuds relais appelés aussi parents sont choisis après l'évaluation de la métrique ETX entre les différents nœuds candidats. La deuxième métrique de routage tient compte de la consommation d'énergie et à cet effet le parent préféré sera celui qui nécessite la plus petite consommation d'énergie. Ces deux métriques de routage ont chacune un inconvénient. La première pourra causer une consommation d'énergie importante alors que la deuxième ne pourra pas garantir la fiabilité de livraison entre les deux nœuds communicants. Pour pallier à ces deux inconvénients, nous avons proposé une métrique de routage qui combine les deux métriques citées précédemment. Les résultats obtenus par cette nouvelle métrique de routage étaient prometteurs et ils avaient surpassé ceux obtenus par chacune des métriques séparément.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en quatre chapitres selon le plan méthodologique suivant :

Chapitre 1 fait l'objet de la présentation des réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs contraintes sous-jacentes.

Chapitre 2 est une présentation du routage dans les réseaux de capteurs sans fil ainsi que sa spécificité.

Chapitre 3 est une présentation détaillée du protocole de routage RPL qui fait l'objet de notre étude.

Chapitre 4 est une évaluation des performances de RPL selon les deux métriques de routage citées précédemment et de la métrique de routage proposée. Cette évaluation est suivie d'une discussion des résultats obtenus.

Chapitre I
Les réseaux de capteurs sans fil

Chapitre I
Les réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction

Aujourd'hui, les réseaux de capteurs sans fil sont de plus en plus populaires du fait de leur facilité de déploiement et leur utilisation. Ces réseaux jouent un rôle primordial dans plusieurs domaines tels que le domaine militaire, le domaine médical, etc... Ils offrent des solutions ouvertes pour ces domaines d'applications. Cependant, leurs contraintes en termes d'énergie, de calcul et de communication ont rendu la conception des protocoles de routage un grand défi.

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'application et leurs architectures.

I.2 Les réseaux de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs peut être vu comme un réseau de microsystèmes autonomes disséminés dans un espace donné et communicant entre eux via une liaison sans fil. L'espace où agissent les capteurs s'appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans les réseaux de capteurs, c'est l'aspect autonome car l'intelligence des capteurs permet de décentraliser l'intelligence du réseau.

I.2.1 Description d'un capteur

Un capteur est un dispositif ayant pour tâche de transformer une grandeur physique en une grandeur quantifiable, généralement électronique, qui peut être interprétée en une donnée binaire exploitable et compréhensible par un système d'information. On trouve de capteurs de position, d'accélération, de mouvement, de luminosité, de température, etc … [2]. La figure 1 illustre la chaîne de collecte de données par un capteur.

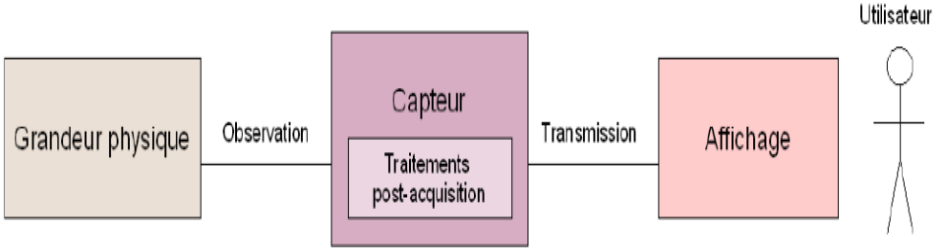


Figure 1: Schématisation de la chaîne de collecte de données

I.2.2 Les composants d'un capteur sans fil

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la figure 2.

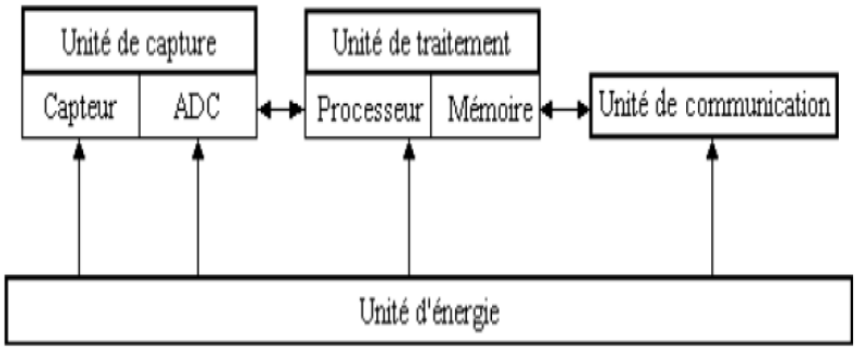


Figure 2: Les composants d'un nœud capteur [3]

- **Unité de capture** *(Sensing unit)* : elle est composée de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC[2].
- **Unité de traitement de données** (*Processing unit*) : les données captées sont communiquées au processeur pour être éventuellement traitées avant d'être transmises ou elles sont stockées dans la mémoire.
- **Unité de transmission de données** (*Transceiver unit*) : elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœuds du réseau.
- **Unité d'énergie** (*Power unit*) : C'est un élément primordial de l'architecture du capteur, le capteur doit disposer de sa propre source d'énergie, c'est elle qui fournit en énergie toutes les autres unités. Cette unité se trouve sous la forme de batteries ou piles alimentant le capteur.

I.3 Domaines d'applications des réseaux de capteurs

La communication sans fil permet aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes. Parmi ces domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut noter la surveillance, le militaire, la santé, le scientifique, l'industriel, le médical, le

[2] ADC : Analog to Digital Converter

climatique, l'environnemental etc. Voici quelques exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines :

I.3.1 Applications militaires

Comme dans le cas de la majorité des technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement 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 adéquat dans un tel domaine. Comme exemple d'application dans ce domaine, on peut penser à un réseau de capteurs déployé sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, comme les zones infectées.

Des tests concluants ont déjà été réalisés dans ce domaine par l'armée américaine dans le désert de Californie [4]. Le projet DSN (Distributed Sensor Network) au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisés les réseaux de capteurs pour rassembler des données distribuées. En outre, un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'intrusions, détection des armes chimiques, biologiques ou radiations nucléaires).

I.3.2 Application à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

I.3.3 Application environnementale

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, comme par exemple : la température, la pression atmosphérique, le dégagement du CO_2, etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que des feux de forêts, des tempêtes ou des inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques, par exemple en déclenchant le processus d'arrosage lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

I.3.4 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers à une étape précoce, etc.). Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur, à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient pour une ultérieure décision médicale**.**

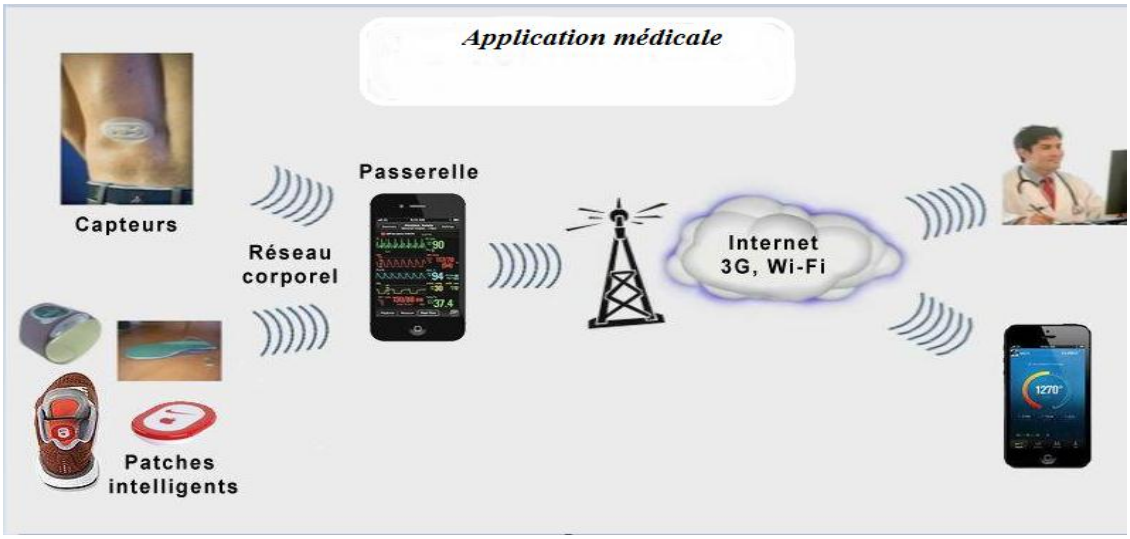


Figure 3: Exemple d'applications médicales

I.3.5 La domotique

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière qui s'éteint et la musique qui se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.



Figure 4: Applications domotiques

I.3.6 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

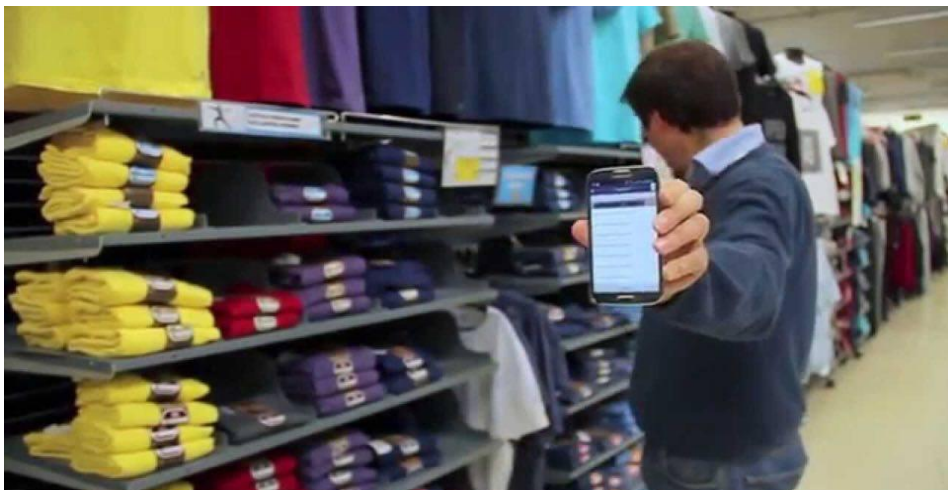


Figure 5: Application commerciale

I.3.7 Applications dans le domaine sportif

L'évolution des réseaux de capteurs est utilisée de plus en plus dans le domaine sportif, à savoir les systèmes de surveillance, les systèmes de calcul de trajectoires (comme dans le tennis), systèmes de détection d'erreurs d'arbitrage (comme dans le football indiquent si le balle a franchi la ligne de but). De même pour contrôler l'état de santé des sportifs, dans ce cadre une application brevetée a été développée par des chercheurs du laboratoire STIC de l'université de Tlemcen.

I.4 Architecture des RCSF

Les nœuds de ce type des réseaux consistent en un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales ou physiologiques d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils sont généralement dispersés aléatoirement à travers une zone géographique, appelée champ de captage, qui définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Les données captées sont acheminées grâce à un routage multi-saut à un nœud considéré comme « un point de collecte », appelé nœud puits (ou sink). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet ou un satellite. Ainsi, l'usager peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits.

La figure 6 illustre un exemple de déploiement de capteurs dans une zone d'intérêt.

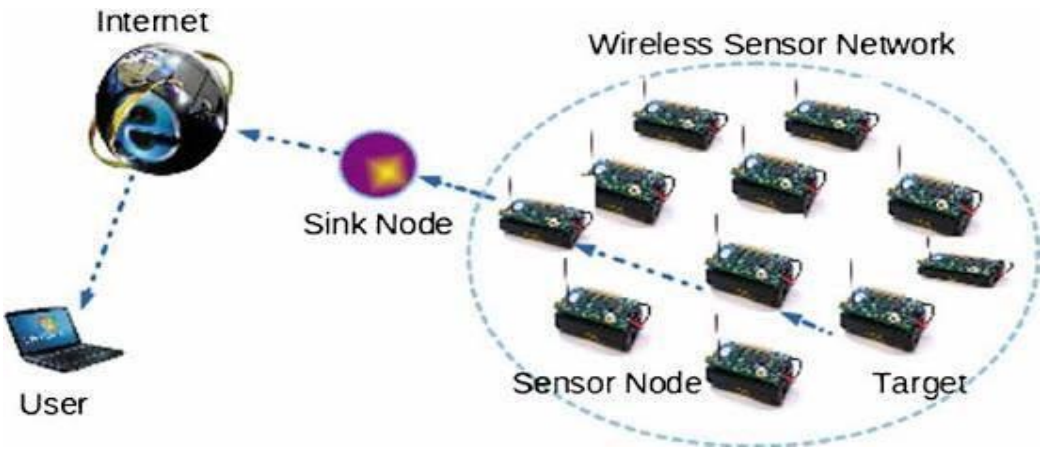


Figure 6: Architecture d'un réseau de capteurs

Il y a deux méthodes pour collecter les informations dans un réseau de capteurs :

I.4.1 Suite à la demande

Lorsque l'on souhaite avoir l'état de la zone de couverture à un moment T, le puits émet des broadcastes vers toute la zone pour que les capteurs remontent leur dernier relevé vers le puits. Les informations sont alors acheminées par le biais d'une communication multi-sauts.

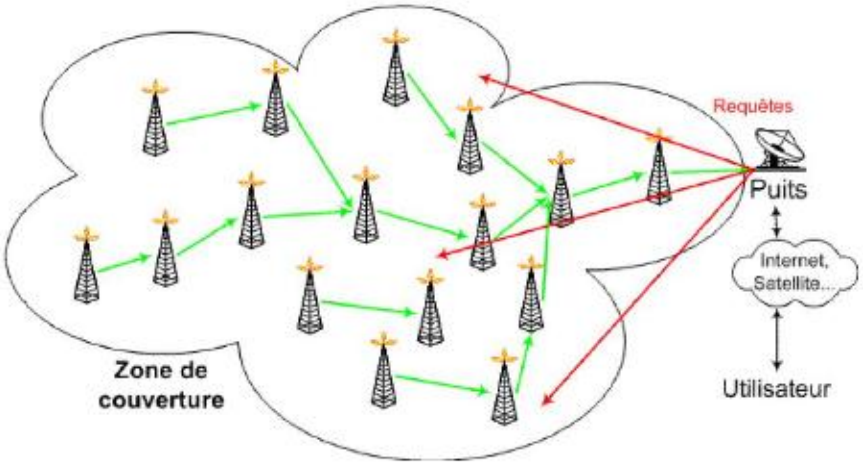


Figure 7: Collecte de données à la demande

I.4.2 Suite à un événement

Un événement se produit en un point de la zone de couverture (changement brusque de température, mouvement...), les capteurs situés à proximité remontent alors les informations relevées et les acheminent jusqu'au puits.

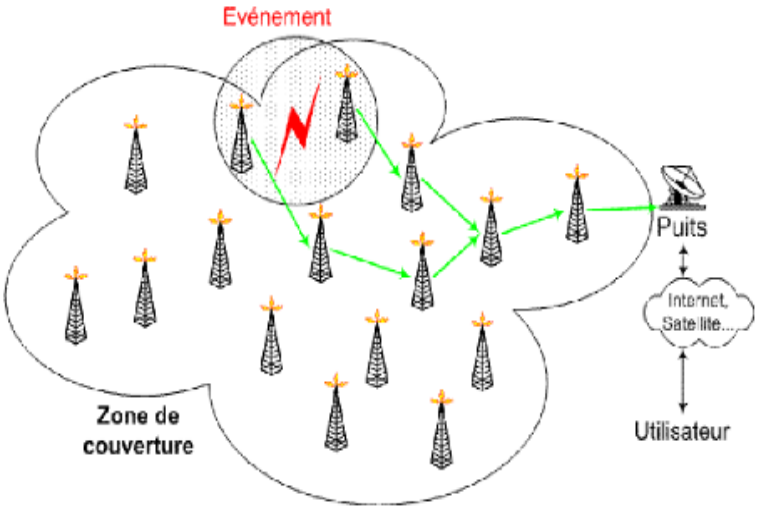


Figure 8: Collecte de données suite à l'occurrence d'un évènement

I.5 Facteurs et contraintes des RCSF

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF [2].

- **Durée de vie du réseau :** C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **Ressources limitées :** En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.
- **Bande passante limitée :** Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.
- **Facteur d'échelle :** Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [5].
- **Topologie dynamique :** La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes :
  - Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de batail par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est donc très probable.
  - Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
  - Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.
- **Agrégation de donnée :** Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec

cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

I.6 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, médicale et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'applications et leurs architectures. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux.

Dans le chapitre suivant, nous introduisons en détails le routage dans les capteurs sans fil en tenant compte de la particularité du routage dans ce type de réseaux.

Chapitre II
Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Chapitre II
Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1 Introduction

Dans les RCSF, les capteurs sont déployés en grand nombre pour surveiller un tel phénomène et faire remontrer l'information à un centre de contrôle distant. Pour atteindre cette finalité , les capteurs ont la capacité de communiquer et collaborer entre eux pour acheminer l'information collectée à la station de base en garantissant sa fiabilité et en empruntant le plus court chemin entre le nœud qui a détecté ce phénomène et la station de base. Cette opération permet le routage de l'information entre le nœud source et le nœud puits à trouver les routes les plus courtes.

Ce chapitre est consacré à la notion de routage dans les réseaux de capteurs sans fil tout en mettant l'accent sur sa spécificité pour les réseaux à ressources limitées.

II.2 Routage dans les RCSF

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un nœud expéditeur jusqu'à un ou plusieurs nœuds destinataires. On parle de routage dans différentes domaines : réseaux téléphoniques, réseaux informatiques (comme Internet), réseaux de transports….. Sa performance est importante dans les réseaux décentralisés, c'est-à-dire où l'information n'est pas distribuée par une seule source, mais échangée entre des agents indépendants.

II.2.1 Les types de cardinalité de la communication

Nous pouvons classifier le processus de routage en fonction du nombre de destinataires et de la manière de délivrance des messages :

- **Unicast** : qui consiste à acheminer les données vers une seule destination déterminée.
- **Broadcast** : qui consiste à diffuser les données à tous les nœuds.
- **Multicast** : qui consiste à délivrer le message à un ensemble de nœuds manifestant un intérêt pour un groupe.

- **Anycast** : qui consiste à délivrer les données à un seul membre d'un groupe, généralement le plus proche, au sens de réseau.

II.2.2 Contraintes de routage dans les RCSF

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux ad hoc dans les points suivants [3] :

- Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre des nœuds.
- Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale «la station de base».
- Les différents capteurs peuvent générer les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- Les nœuds capteurs exigent ainsi une gestion soigneuse des ressources.

En raison de ces différences, de nouveaux protocoles de routage ont été proposés dans les réseaux de capteurs.

II.3 Classification des protocoles de routage

Nous pouvons classifier les protocoles de routage selon deux stratégies : la manière d'établissement des routes et la topologie des réseaux. La figure résume cette classification.

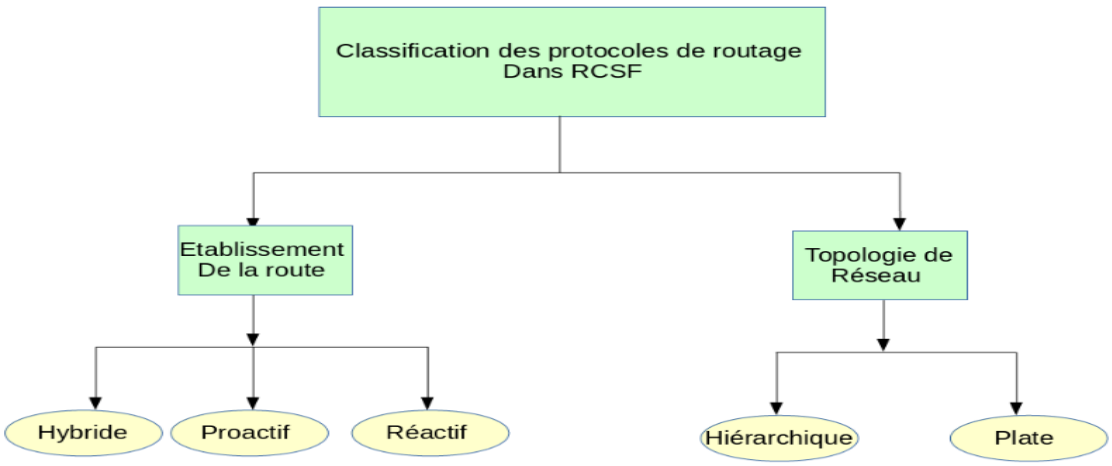


Figure 9: Classification des protocoles de routage dans les RCSF

II.3.1 Topologie du réseau

La topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau. Il existe deux principales topologies dans les protocoles de routage pour les RCSF [6].

a) Topologie plate

Dans une topologie plate, tous les nœuds possèdent le même rôle. Les nœuds sont semblables en termes de ressources.

b) Topologie hiérarchique

Afin d'augmenter la sociabilité du système, les topologies hiérarchiques ont été introduites en divisant les nœuds en plusieurs niveaux de responsabilité. L'une des méthodes les plus employées est le clustering, où le réseau est partitionné en groupes appelés "clusters". Un cluster est constitué d'un chef (cluster-Head) et de ses membres. Le cluster-head est responsable de l'agrégation des données collectées par les membres et leur envoi soit directement à la station de base ou selon un schéma de routage CH-à-CH jusqu'à l'arrivée à la station de base.

II.3.2 Manière d'établissement des routes

Suivant la manière de construction et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides [6].

a) Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles (qui peuvent représenter l'ensemble de tous les nœuds du réseau). Au niveau de chaque nœud du réseau, les routes sont sauvegardées même si elles ne sont pas utilisées. La sauvegarde permanente des chemins de routage est assurée par un échange continu des messages de mise à jour des chemins [7].

Avec un protocole proactif, les routes sont disponibles immédiatement, ainsi l'avantage d'un tel protocole est le gain de temps lors d'une demande de route. Le problème est que, les changement de routes peuvent être plus fréquents que la demande de la route et le trafic induit par les messages de contrôle et de mise à jour des tables de routage peut être important et partiellement inutile, ce qui gaspille la capacité du réseau sans fil. De plus, la taille des tables de routage croit linéairement en fonction du nombre de nœuds.

b) Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (dits aussi: protocoles de routage à la demande), représentent les protocoles les plus récents proposés dans le but d'assurer le service du routage dans les réseaux sans fil.

La majorité des solutions proposées pour résoudre le problème de routage dans les réseaux ad hoc, et qui ont été évaluées par le groupe de travail MANET (Mobile Ad Hoc Networking working Groupe) de l'IETF (Internet Engineering Task Force), appartiennent à cette classe de protocoles de routage. Les protocoles de routage appartenant à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte globale de routes est lancée, et cela dans le but d'obtenir une information. Actuellement, le plus connu de ces protocoles est AODV [8].

A l'opposé des protocoles proactifs, dans le cas d'un protocole réactif, aucun message de contrôle ne charge le réseau pour des routes inutilisées ce qui permet de ne pas gaspiller les ressources du réseau. Mais la mise en place d'une route par inondation peut être coûteuse et provoquer des délais importants avant l'ouverture de la route et les retards dépassent bien souvent les délais moyens admis par les processus de découverte de routes.

c) Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides sont un mélange des deux premiers types. Un nœud agit d'une façon proactive dans une zone limitée à son voisinage jusqu'à n sauts (n à préciser) et devient réactif au-delà de n sauts.

Le protocole hybride est un protocole qui se veut comme une solution mettant en commun les avantages des deux approches précédentes en utilisant une notion de découpe du réseau. Cependant, il rassemble toujours quelques inconvénients des deux approches proactives et réactives.

II.4 Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF

La performance des réseaux de capteurs sans fil est fondée sur les facteurs suivants :

- **Evolutivité :** l'évolutivité est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fil. Une zone de réseau n'est pas toujours statique, elle change selon les besoins des utilisateurs. Tous les nœuds dans le domaine du réseau doivent être évolutifs ou être en mesure de s'adapter aux changements dans la structure du réseau en fonction de l'utilisateur.

- **L'énergie** : chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement, le stockage et la transmission. Un nœud dans le réseau doit savoir combien d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis. L'énergie consommée peut varier selon le type de fonctionnalité ou l'activité qu'il a à accomplir. En plus, l'énergie est considérée comme une ressource précieuse pour les réseaux de capteurs vu que ces derniers présentent une autonomie d'énergie.
- **Le temps de traitement** : il se réfère au temps pris par le nœud dans le réseau pour assurer l'ensemble de l'opération commençant par la détection, le traitement des données ou le stockage de données, la transmission ou la réception sur le réseau.
- **Le schéma de transmission** : la transmission de données par les nœuds de capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi saut.
- **La capacité du réseau** : tous les nœuds du réseau de capteurs utilisent certaines ressources du réseau qui les aident à accomplir certaines activités comme la détection ou la transformation.
- **Synchronisation :** dans les communications radio entre les nœuds de capteurs d'un RCSF, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour se mettre en veille et se réveiller que ses voisins.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les notions de routage dans RCSF, en mettant l'accent sur les contraintes, la classification et les critères des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter avec plus de détails le fonctionnement du protocole de routage RPL.

Chapitre III
Le protocole de routage RPL

Chapitre III
Le protocole de routage RPL

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter avec plus de détails le fonctionnement du protocole de routage RPL. Ce protocole a été développé pour des systèmes à ressources limitées et pour les systèmes qui se caractérisent par l'instabilité des connexions entre les nœuds à cause de présence d'obstacles. Par ailleurs, RPL instaure à chaque nœud un rang qui correspond à une distance virtuelle de ce dernier au nœud puits ceci est dans le but d'éviter des boucles de routage.

III.2 RPL (Routing Protocol for Low power and lossy networks-LLNS)

Le protocole RPL [1] est un protocole qui a été conçu afin de prendre en charge les exigences spécifiques de ces réseaux à ressources limitées.

RPL est protocole de routage proactif à vecteur de distance qui construit un DODAG (Destination Oriented Directe Acyclic Graph) pour l'acheminement des données vers la station de base. Le DODAG construit permet à chaque nœud du DODAG de transmettre les données qu'il a récolté jusqu'au DODAG root (racine). Chaque nœud dans le DODAG sélectionne un parent selon une métrique de routage donnée et une fonction objective. Les données récoltées sont acheminées de fils à parent jusqu'à la racine.

Les métriques de routage utilisables par RPL sont définies dans le RFC6551 . Ces métriques sont les informations qui seront prises en compte pour la création de la topologie. On calcule donc le rang d'un nœud en fonction de la métriques donnée qui peut être une mesure de la qualité d'un lien donné, de la propriété d'un nœud, et également une contrainte à respecter. On peut par exemple essayer de minimiser le délai de bout-en-bout, le nombre de transmissions nécessaires pour atteindre le puits de données, l'énergie consommée par le réseau, ou éviter d'utiliser des chemins avec une trop forte latence, etc.

Les métriques de routage sont utilisées pour calculer le rand des nœuds à l'aide d'une fonction objectif (OF). A l'heure actuelle, deux OF sont définies : Objective Function Zero (OF0 défini dans RFC6552) et Minimum Rank With Hysteresis Objective Function (MRHOF défini dans RFC6719). Le rôle de la fonction d'objectif est donc de prendre en entrée une valeur de

métrique et de calculer le rang correspondant pour un nœud par rapport à un nœud donné. Elle définit aussi le processus de sélection d'un parent une fois le calcul des rangs du voisinage est effectué.

Par ailleurs, pour le bon fonctionnement du protocole RPL, chaque nœud contient la base des informations suivantes :

- **Un ID du nœud :** cet ID (identifiant) est unique, on peut utiliser l'adresse IP du nœud par exemple.
- **Un rang (R) :** le rang est une valeur calculée à l'aide d'une fonction OCP (Objective Code Point) où le rang d'un nœud est calculé en fonction du rand de son parent :

$$\boldsymbol{R(i) = R\big(p(i)\big)\ \ avec\ \ X\big(i, p(i)\big) + 1}$$

  où le R(i) est le rang du nœud i, le p(i) est le père par défaut de i , le X(i , j) est la valeur métrique de routage utilisée. Elle pourra être la qualité de lien (ETX) ou l'énergie consommée. ETX est calculée à l'aide des rapports périodiques envoyés depuis la couche MAC vers la couche réseau sur le nombre des messages envoyés par rapport au nombre d'ACKs reçus).

- **Liste des prédécesseurs** (ID nœud père, rang du nœud père, métrique de routage).
- **Père par défaut**.
- **Liste des destinataires** (ID nœud père, ID saut précèdent, métrique de routage).

III.2.1 Messages du protocole RPL

Le protocole RPL comporte quatre types de messages de contrôle utilisés dans la phase de découverte de routes. Ces messages sont :

1. **DIO :** DODAG Information Object (DODAGID, IDRoot, Rang du root, infos sur OCF) : envoyé de manière périodique depuis le nœud racine vers tous ses nœuds voisins.
2. **DAO :** Destination Advertisment Object (ID, Rang, IDs route infos), Le DAO est un message envoyé par les nœuds esclaves (capteurs) au nœud racine afin de répondre au message DIO.
3. **DIS :** DODAG Information Sollicitation, c'est un message de sollicitation envoyé par les nœuds non voisins du nœud racine qui n'ont reçu aucun message DIO vers l'un des voisins du nœud racine. Le nœud voisin se charge du transfert des messages DIO et DAO du et vers le nœud racine.
4. **DAO-ACK :** c'est un acquittement du message DIO envoyé par les récepteurs.

III.2.2 Construction du DODAG

Le processus de construction de la structure DODAG commence à la racine ou LBR (LoWPAN Border Router) qui est généralement le nœud de collecte de données (le puits ou un actionneur). Il pourrait y avoir des racines multiples configurées dans le réseau. Le protocole de routage RPL spécifie un ensemble de nouveaux messages de contrôle ICMPv6 pour échanger des informations liées à la construction de la structure DODAG.

La racine commence la diffusion des informations concernant la structure en utilisant le message DIO (DODAG Information Object). Les nœuds à portée de communication de la racine recevront et traiteront ce message DIO, puis ils rendront une décision (joindre la structure ou pas) fondée sur certaines règles (selon la fonction objectif, les caractéristiques du DAG et le coût du chemin annoncé). Une fois que le nœud s'est joint à la structure, il a une route vers la racine de la structure DODAG comme la figure 10(a)).

La racine du DODAG est appelée le parent du nœud. Le nœud calcule son rang dans le graphe, qui représente la position du nœud dans la structure DODAG. Si ce nœud est configuré pour agir comme un routeur dans le réseau il commence à diffuser à son tour dans son voisinage les nouvelles informations de la structure qu'il vient de rejoindre à travers des messages DIOs. Si le nœud n'est pas configuré pour être un routeur alors il rejoint tout simplement la structure DODAG et n'envoie pas de message DIO. Les nœuds voisins recevant cette annonce vont répéter ce processus de sélection de parent, d'ajout d'itinéraire et d'annonce des nouvelles informations concernant la structure DODAG à l'aide des messages DIOs comme montre les figures 10(b) et 10(c). Ce processus continue jusqu'à couvrir tous les nœuds du réseau. Chaque nœud de la structure DODAG a une entrée de routage vers son parent (ou plusieurs parents selon la fonction objectif) à travers lequel ce nœud peut atteindre la racine de la structure DODAG. En outre, chaque nœud dans le graphe a un rang qui représente la position relative de ce nœud par rapport à la racine de la structure DODAG comme montre la figure 10 (d). La notion de rang est utilisée par RPL à des fins diverses, y compris l'évitement les boucles.

Les différentes étapes du processus de construction graphique sont représentées dans la figure 10 où les messages DAO (Destination Avertissement Object) visent à maintenir les routes descendantes et ne sont utilisés que pour des applications nécessitant des trafics de type point à multipoint et point à point [9].

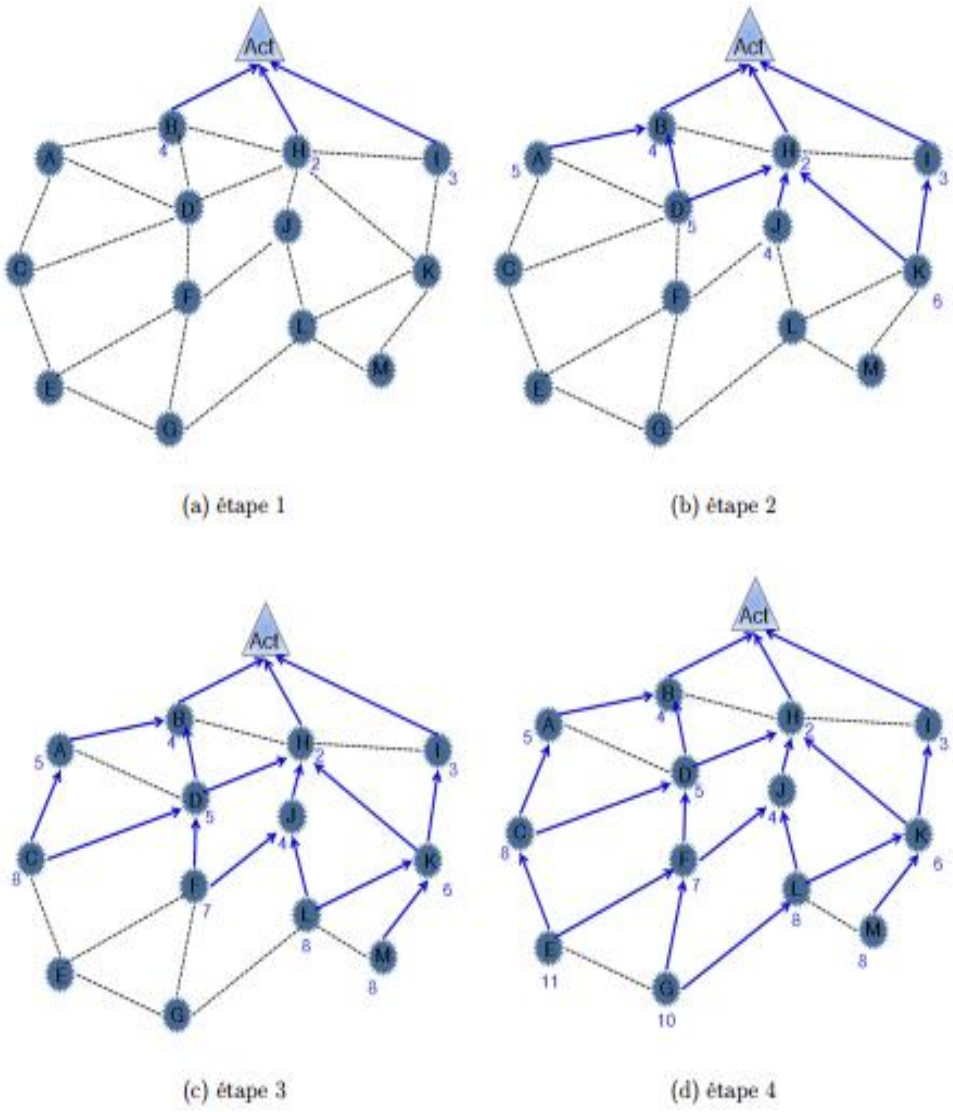


Figure 10: Exemple illustrant la construction d'un DODAG [9]

III.2.3 Trafics supportés par le DODAG

Après la construction de la structure logique en DODAG, quand un nœud a des données à envoyer vers la racine, il les envoie vers un de ses parents (appelé son parent préféré). Ces données vont remonter la structure jusqu'à atteindre la destination finale. Ce modèle représente le modèle de trafic MP2P (multipoints à point). Les messages circulent des nœuds feuilles au(x) nœud(s) racine(s). D'autres applications nécessitent la présence d'un trafic dans le sens opposé. Ce trafic, P2MP (point à multipoints), écoule les informations vers les nœuds feuilles. Ce trafic peut provenir de l'extérieur du réseau, à partir de(s) nœud(s) racine(s). Tout cela nécessite une table de routage qui doit être construite au niveau de chaque nœud et un mécanisme pour remplir ces routes. Ceci est accompli par le message DAO (Destination Avertissement Object). Les messages DAO sont

utilisés pour annoncer l'accessibilité vers les nœuds qui peuvent être des destinations potentielles. Un nœud appartenant à la structure DODAG enverra un message DAO à son ensemble de parents. A la réception de ce message DAO, un nœud parent ajoute une entrée dans la table de routage et il envoie à son tour un message DAO à son ensemble de parents (des agrégations des informations reçues peuvent être envisagées). Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'information atteigne la racine du DODAG.

Le protocole RPL soutient également un autre mode appelé « mode de fonctionnement sans stockage» où aucun nœud intermédiaire ne stocke les routes vers les nœuds qui viennent de s'annoncer avec des DAOs. Le nœud puits utilise alors un routage par la source. Le protocole RPL prend également en charge le trafic de type point à point (P2P) (trafic entre deux nœuds appartenant au même DODAG). Quand un nœud envoie un message vers un autre nœud dans la structure DODAG, ce message voyage en direction de la racine du DODAG jusqu'à atteindre un nœud ancêtre commun, ayant une connaissance de la route, au niveau duquel le message sera transmis en direction de la destination finale [9].

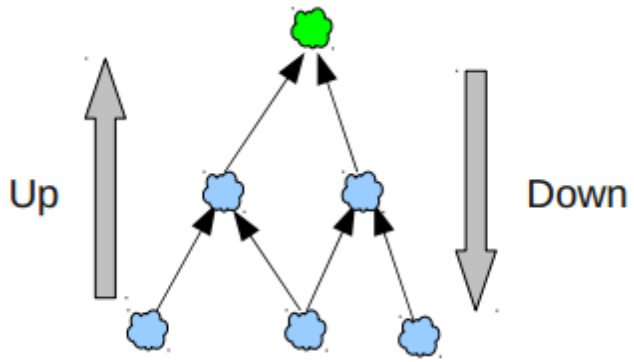


Figure 11: Trafics supportés par le DODAG [9]

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le protocole RPL en cours de standardisation au sein du groupe de travail de L'IETF. Nous avons représenté une description détaillée de ce protocole : son fonctionnement, la construction de DODAG et le trafic supporté par DODAG.

Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer le protocole RPL selon deux métriques de routage et après nous proposons une nouvelle métrique de routage pour améliorer ses performances.

Chapitre IV
Améliorations des performances de RPL

Chapitre *IV*
Améliorations des performances de RPL

IV.1 Introduction

Le protocole RPL présenté dans le chapitre précédent est l'un des protocoles standards de communication. Ce protocole a été largement utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil et l'internet des objets puisqu'il est adapté aux systèmes à ressources limitées et qui présentent certaine hétérogénéité.

Dans ce chapitre, nous évaluons le protocole RPL selon certaines métriques de routage : ETX et l'énergie consommée. Puis, nous proposons une métrique de routage pour améliorer les performances de RPL. Cette métrique combine les deux métriques de routage ETX et l'énergie consommée. Pour ce faire, nous avons utilisé des outils logiciels spéciaux pour les systèmes à ressources limitées tels qu'un système d'exploitation léger (Contiki) et le simulateur COOJA.

IV.2 Outils de la simulation

IV.2.1 Contiki

C'est un système d'exploitation léger et flexible développé pour les systèmes à ressources limitées tels que les réseaux capteurs. Il est utilisé pour faciliter le développement des applications dédiées à ces capteurs.

Contiki a été développé par une équipe de recherche du centre suédois SICS. Il propose les principales caractéristiques et fonctionnalités d'un système d'exploitation tout en favorisant une consommation énergétique et une utilisation mémoire minimales.

Ses principaux sont le support des protocoles IPv6 et 6LoWPAN, sa flexibilité et sa portabilité. Il est disponible gratuitement sous licence BSD et il peut être utilisé et modifié, même à des fins commerciales.

a) Architecture

Contiki est développé en langage C et il est constitué d'un noyau, de bibliothèques, d'un ordonnanceur et d'un jeu de processus. Comme tout système d'exploitation, son rôle est de gérer les ressources physiques telles que le processeur, la mémoire et les périphériques informatiques (d'entrées/sorties) comme montre la figure 12. Il fournit ensuite aux applications des interfaces

permettant d'utiliser ces ressources. Conçu pour les modules de capteurs sans fil il occupe peu d'espace en mémoire et permet une consommation électrique très faible.

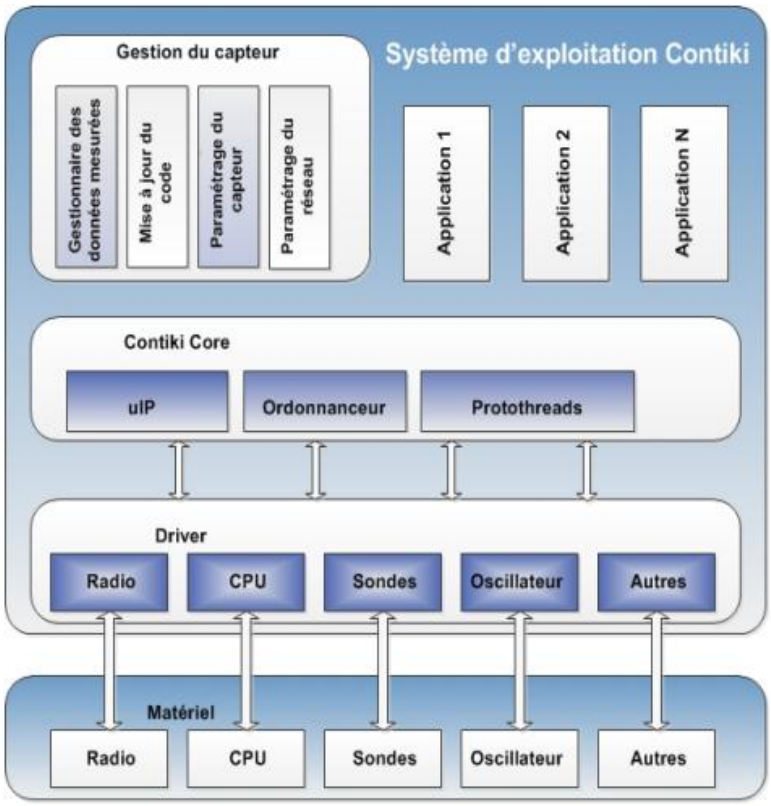


Figure 12: Architecture de Contiki

b) Connectivité

Contiki offre deux types de connectivité comme montre la figure 13 :

- **La couche Rime** : elle permet un dialogue avec les capteurs voisins ainsi que le routage.
- **La couche uIP** : orientée Internet, elle offre les services essentiels du protocole IP mais nécessite plus de ressources que Rime. Contiki gère les standards 6LoWPAN, RPL, CoAP.

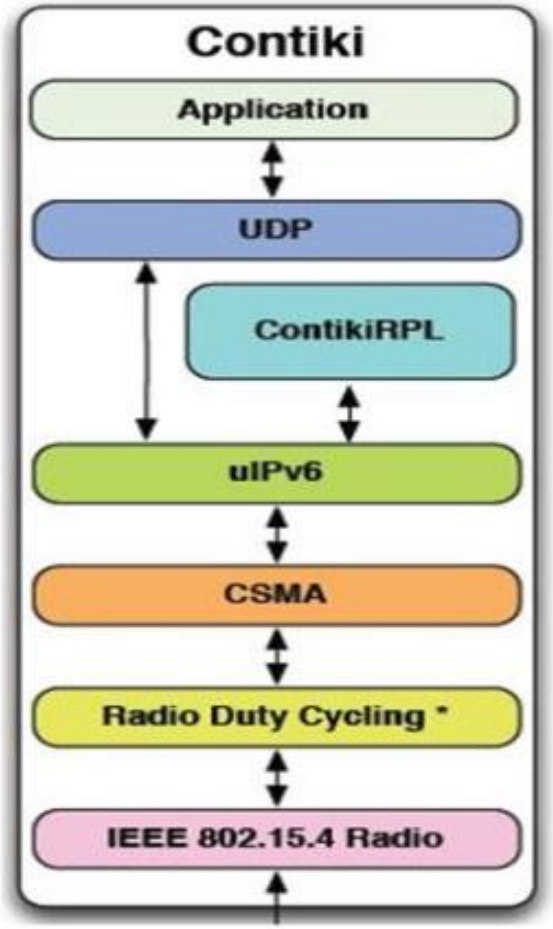


Figure 13: Pile protocolaire de Contiki [10]

IV.2.2 Simulateur Cooja

Contiki propose un simulateur de réseau appelé Cooja. Ce simulateur permet l'émulation de différents capteurs sur lesquels seront chargés un système d'exploitation et des applications. Cooja permet ensuite de simuler les connexions réseaux et d'interagir avec les capteurs. Cet outil permet aux développeurs de tester les applications à moindre coût.

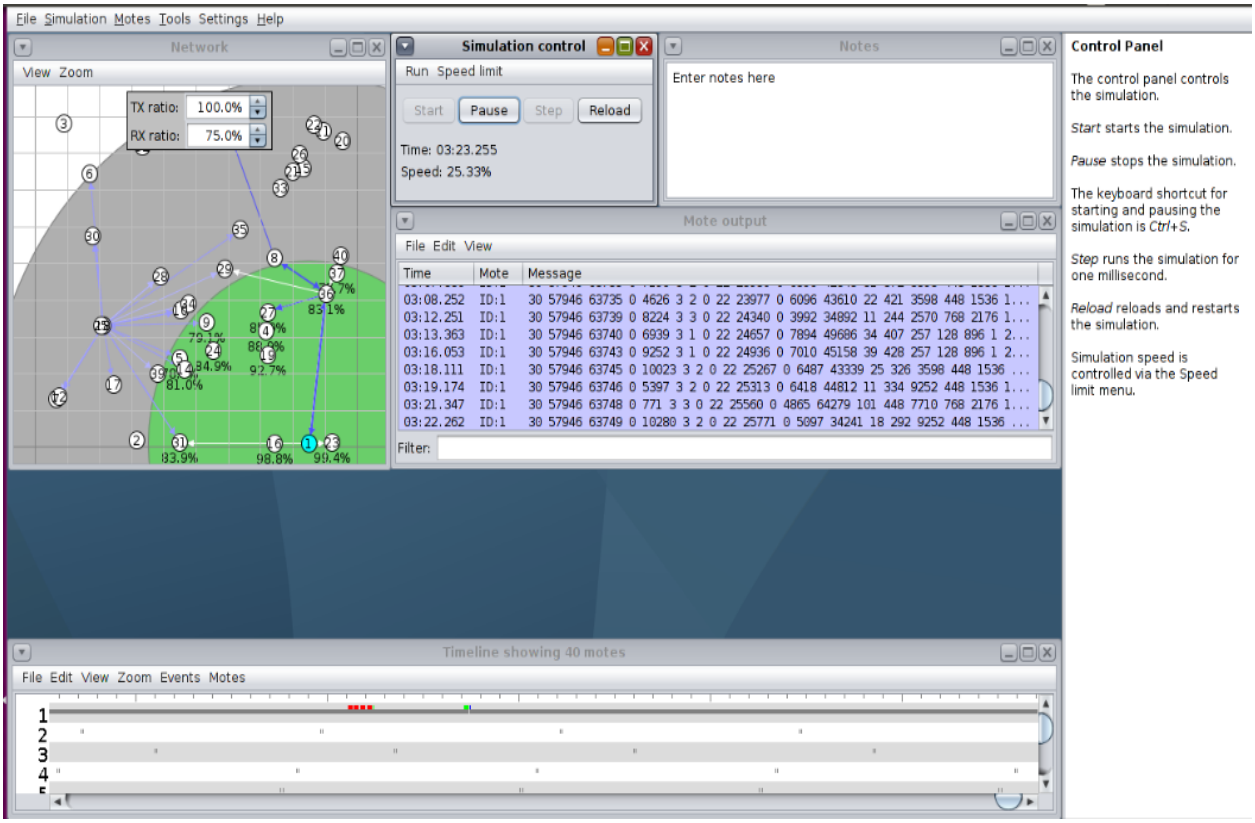


Figure 14: Interface graphique de Cooja

IV.2.3 Environnement de développement

Pour évaluer les performances de RPL, nous avons utilisé Ubuntu 15.04 LTS, Contiki 2.7, langage « C » pour programmer les capteurs. La machine utilisée dans la simulation du réseau est caractérisée par les paramètres suivants :

Tableau 1: Caractéristiques de la machine utilisée pour les simulations

Champ	Valeur
Processeur	Intel(R) Core(TM) i3-3217U CPU @ 1.80GHz
RAM	2.00 Go
Disque dur	425 Go

IV.3 Evaluation de RPL

Dans notre simulation, on a utilisé l'exemple de rpl-collect et un environnement de simulation comme montre le tableau 2.

Tableau 2: Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Simulateur	Cooja
Nombre de nœuds	[10-20-30-40-50]
Nombre de nœuds racines	1
Durée de la simulation (s)	900
Identité du nœud racine	1
Surface (mètres)	300 X 300
La fonction objective	MRHOF
Mote startup delay (ms)	1.000
Random seed	123.456
Topologie	Random
Mote types	Sky mote
Radio Environment	UDGM(Distance Loss)

IV.3.1 Métriques de la simulation

Les métriques sont des paramètres de test du protocole de routage qui permettent de mesurer les performances de celui-ci. Dans notre étude, nous avons pris en compte les métriques suivantes :

- **Taux de réussite (PDR)** : représente le rapport entre le nombre de paquets de données livrées à la racine et le nombre de paquets envoyés par les différents nœuds du DODAG :

$$PDR = \frac{\sum Messages\ reçus\ par\ la\ racine}{\sum Messages\ envoyés\ par\ les\ noeuds\ du\ DODAG}$$

- **Taux de perte** : représente le rapport entre le nombre de paquets de données perdus et la somme de paquets livrés et le nombre de paquets perdus :

$$Taux\ de\ Perte = \frac{Nombre\ de\ paquets\ perdus}{Nombre\ de\ paquets\ émis}$$

- **Energie** : représente l'énergie consommée par l'ensemble des nœuds du réseau.

IV.3.2 Evaluation selon différentes métriques de routage

Avant de faire les simulations de notre évaluation en injectant à chaque fois les configurations suivantes dans le fichier "rpl-conf.h".

a) Evaluation d'ETX

```
#ifdef RPL_CONF_DAG_MC
#define RPL_DAG_MC RPL_CONF_DAG_MC
#else
#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_ETX
#endif /* RPL_CONF_DAG_MC *
```

b) Evaluation d'énergie

```
#ifdef RPL_CONF_DAG_MC
#define RPL_DAG_MC RPL_CONF_DAG_MC
#else
#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_ENERGY
#endif /* RPL_CONF_DAG_MC *
```

IV.3.3 Résultats et Discussion

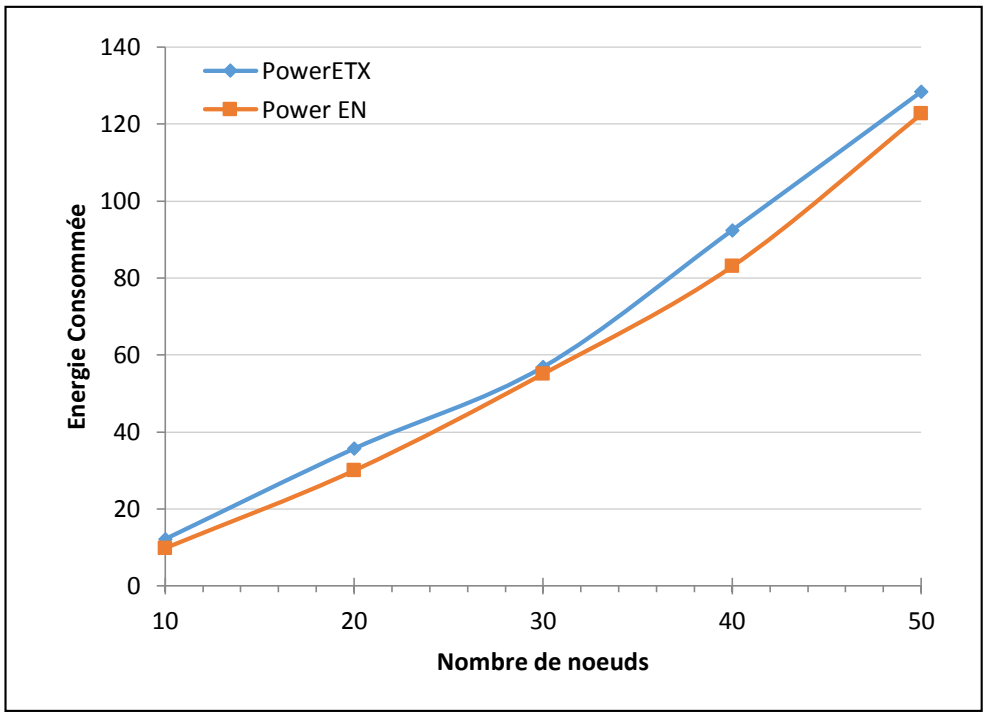


Figure 15 : Consommation de l'énergie en fonction de la taille du réseau

La figure 15 représente la consommation d'énergie en fonction de la taille du réseau. On remarque que l'énergie augmente quand le nombre de nœuds augmente. En plus, quand la métrique de routage "Energie" est utilisée, la consommation de l'énergie sera moins comparativement à celle associée à ETX car dans la première métrique de routage un nœud choisi son parent préféré selon la consommation de l'énergie alors que dans la deuxième seulement la qualité de lie est prise en considération.

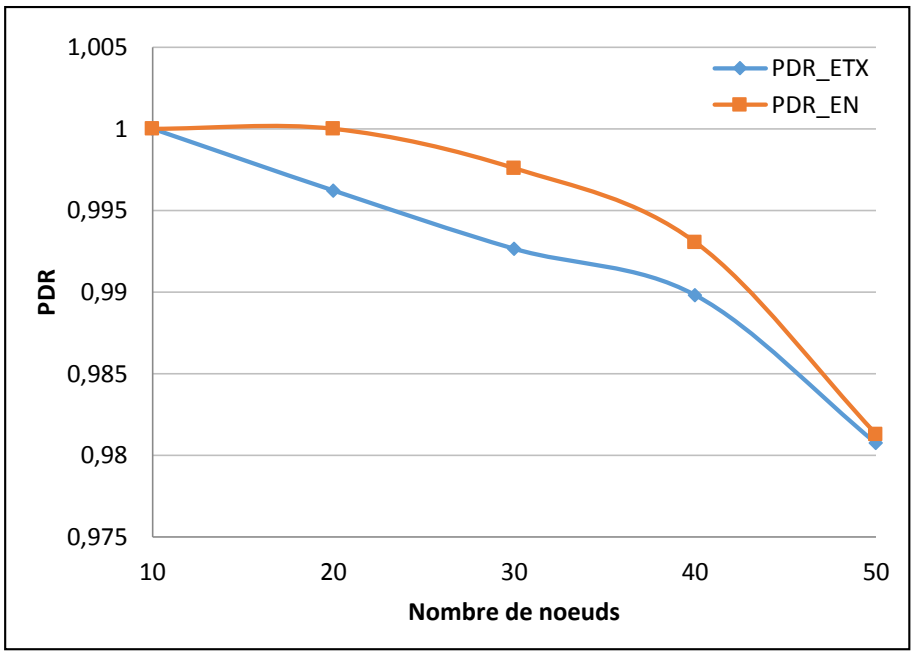


Figure 16: PDR vs. Nombre de nœuds

D'après la figure 16, dans l'intervalle des nœuds [10 à 20] on remarque que le PDR est de l'ordre 100% pour la métrique de routage "Energie". Cependant, le PDR diminue pour les deux métriques quand le nombre de nœuds augmente, cela s'explique par le fait que le nombre de collisions de paquets augmente proportionnellement au nombre de nœuds dans le réseau.

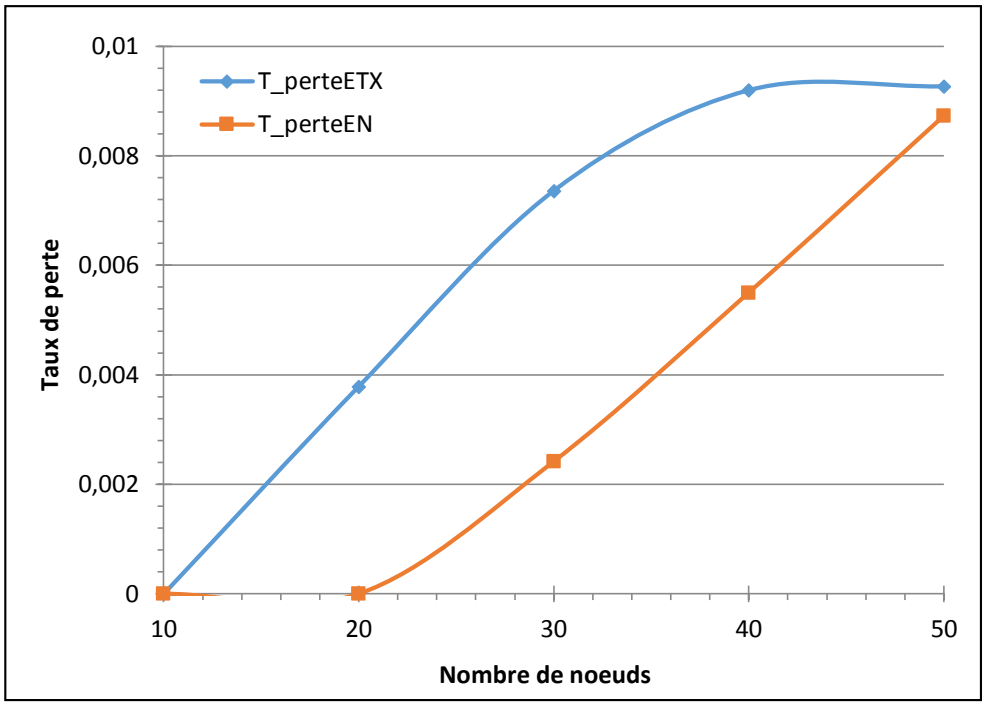


Figure 17: Taux de perte vs. Nombre de nœuds

D'après la figure 17, dans l'intervalle des nœuds [10 à 20] on remarque que le taux de perte de paquets est nul pour la métrique de routage "Energie". D'autre part lorsque le nombre de nœuds augmente on remarque que le taux de perte augmente cela s'explique par le nombre élevé de collisions lors des transmissions.

IV.4 Amélioration proposée

Pour améliorer les performances de RPL, nous avons proposé de combiner les deux métriques de routage : Energie et ETX. Cette amélioration nécessite des modifications dans les fichiers rpl.h, ICMPv6.h, rpl-dag.c.

IV.4.1 Démarche à suivre

Tout d'abord, nous avons ajouté la nouvelle métrique **#define RPL_DAG_MC_EN_ETX** dans le fichier rpl-con.h.

```
#ifdef RPL_CONF_DAG_MC
#define RPL_DAG_MC RPL_CONF_DAG_MC
#else
#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_EN_ETX
#endif /* RPL_CONF_DAG_MC *
```

Enfin, nous avons modifié dans les fichiers rpl-dag.c , icmp6.c et la grande modification dans le fichier mrhof.c (la fonction objectif) .

Partie 1 : (dans le fichier mrhof.c)

```
static rpl_path_metric_t
calculate_path_metric(rpl_parent_t *p)
{


  if(p == NULL) {
    return MAX_PATH_COST * RPL_DAG_MC_ETX_DIVISOR;
  }

#if RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_NONE
  return p->rank + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ETX
  return p->mc.obj.etx + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ENERGY
  return p->mc.obj.energy.energy_est + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_EN_ETX
  metric2 = p->mc.obj.energy.energy_est;
  metric1 = p->mc.obj.etx;
  metric = metric1 + 16*metric2;
  p->mc.obj.cout = metric;
  return metric + (uint16_t)p->link_metric;
#else
#error "Unsupported RPL_DAG_MC configured. See rpl.h."
#endif /* RPL_DAG_MC */
}
```

Partie 2 : (dans le fichier mrhof.c)

```
#if RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ETX
  instance->mc.length = sizeof(instance->mc.obj.etx);
  instance->mc.obj.etx = path_metric;

  PRINTF("RPL: My path ETX to the root is %u.%u\n",
         instance->mc.obj.etx / RPL_DAG_MC_ETX_DIVISOR,
         (instance->mc.obj.etx % RPL_DAG_MC_ETX_DIVISOR * 100) /
          RPL_DAG_MC_ETX_DIVISOR);
#elif (RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ENERGY)
  instance->mc.length = sizeof(instance->mc.obj.energy);

  if(dag->rank == ROOT_RANK(instance)) {
    type = RPL_DAG_MC_ENERGY_TYPE_MAINS;
  } else {
    type = RPL_DAG_MC_ENERGY_TYPE_BATTERY;
  }

  instance->mc.obj.energy.flags = type << RPL_DAG_MC_ENERGY_TYPE;
  instance->mc.obj.energy.energy_est = path_metric;
#elif (RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_EN_ETX)
  instance->mc.length = sizeof(instance->mc.obj.cout);

  instance->mc.obj.etx = metric1;
  instance->mc.obj.energy.energy_est = metric2;
  instance->mc.obj.cout = metric1 + 16*metric2;

#endif /* RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ETX */
}
#endif /* RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_NONE */
```

IV.4.2 Résultats et Discussion après l'amélioration

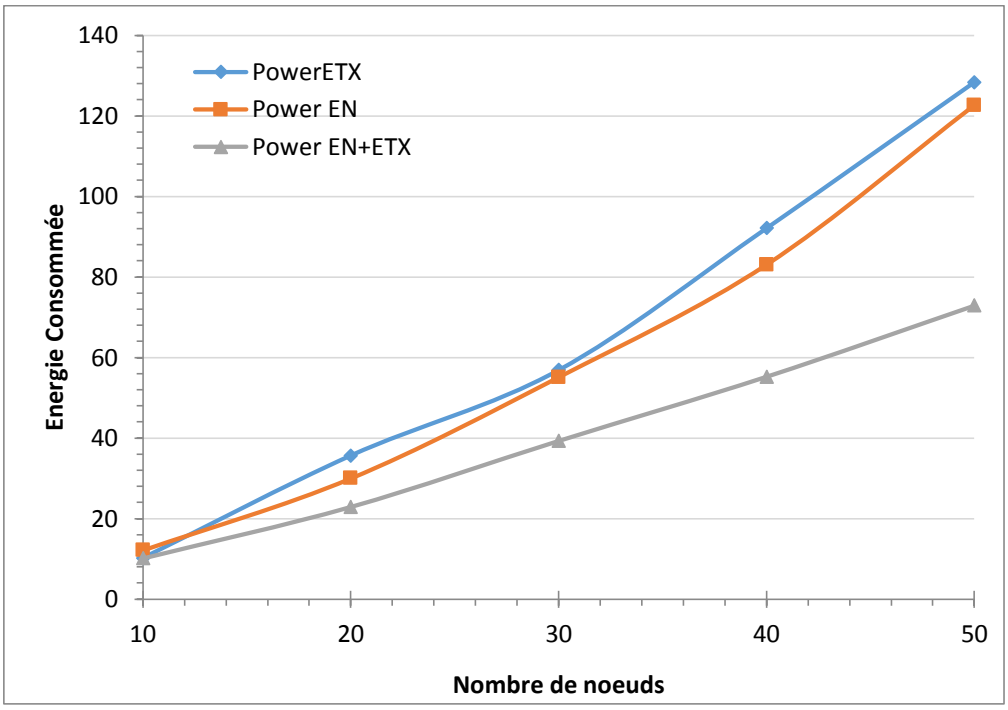


Figure 18: Evaluation du RPL amélioré en terme d'énergie

La figure 18 montre la consommation d'énergie en fonction de la taille du réseau. Nous remarquons que la consommation d'énergie est moins quand nous avons combiné les deux métriques car nous avons essayé de combler les inconvénients des deux métriques.

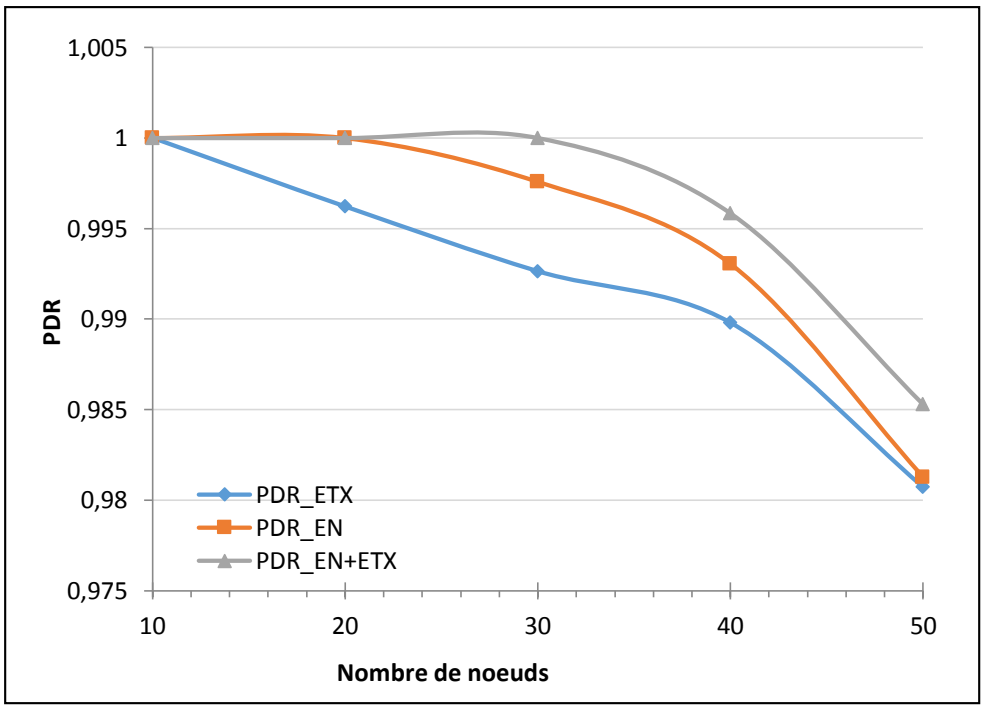


Figure 19: PDR dans RPL amélioré vs. Nombre de nœuds

D'après la figure 19, dans l'intervalle des nœuds [10 à 30] nous remarquons que le PDR après l'amélioration est de l'ordre de 100% et il est meilleur que celui dans les deux métriques séparément.

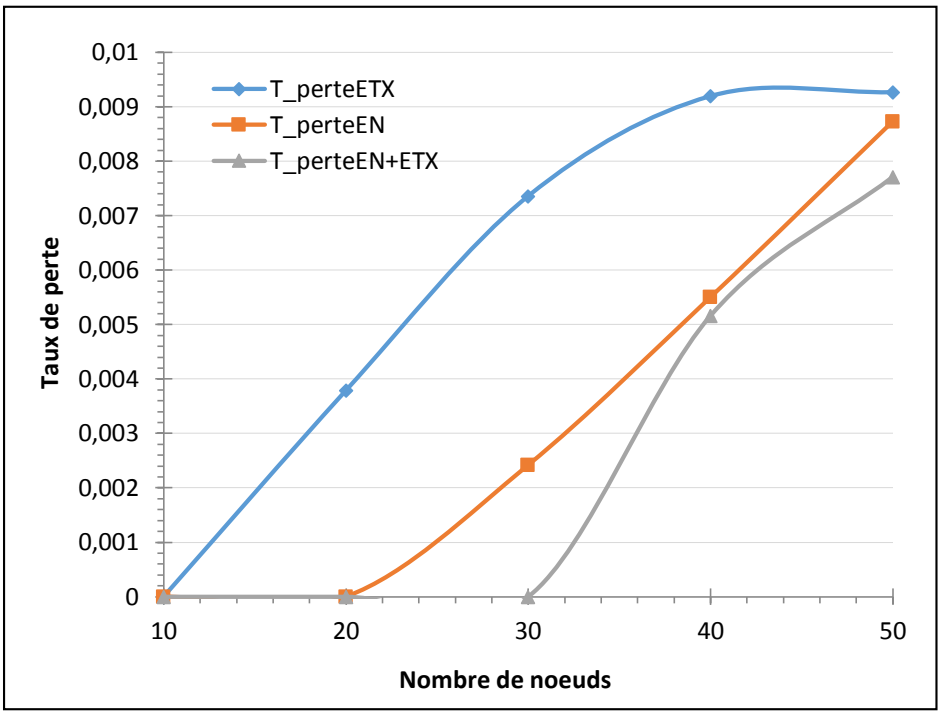


Figure 20: Taux de parte dans RPL amélioré vs. Nombre de nœuds

D'après la figure 20, dans l'intervalle des nœuds [10 à 30] nous remarquons que le taux de perte de paquets après l'amélioration est de l'ordre de 0% et il est inferieur par rapport aux deux autres cela s'explique qu'il y a moins de collisions.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évaluation du protocole RPL selon deux métriques de routage : ETX et l'énergie. Après nous avons essayé d'améliorer ce protocole en combinant ces deux métriques. Les résultats obtenus montrent une grande amélioration dans l'énergie consommée par le réseau, le taux de perte de paquets et le taux de paquets délivrés avec succès (PDR).

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux de capteurs ont un large potentiel avec diverses applications pratiques et utiles. Cependant, il y a encore beaucoup de défis qui doivent être abordés pour garantir un fonctionnement efficace de ces réseaux dans des applications réelles. Pour cela plusieurs protocoles sont proposés pour effectuer le routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil comme le protocole RPL.

Dans ce mémoire, nous avons évalué les performances du protocole RPL selon deux métriques de routage : ETX et énergie. Pour cela, nous avons choisi de le simuler dans une topologie Random . Les résultats obtenus ont été plus ou moins bons ce qui a nécessité de les améliorer. Dans ce contexte, nous avons proposé d'améliorer les performances de RPL. Pour ce faire, nous avons combiné les deux métriques de routage citées en haut pour combler leurs limites. Les résultats obtenus étaient meilleurs en termes de consommation d'énergie, du taux de paquets délivrés avec succès et du taux de perte de paquets.

La réalisation de ce projet de fin d'étude nous a été très bénéfique où on a pu :

- maitriser un nouveau simulateur Cooja.
- Comprendre le fonctionnement d'un nouveau type de réseaux.
- comprendre le fonctionnement de protocoles de routage RPL.

Le thème traité est un thème de recherche qui nécessite une continuité et pourquoi pas l'exploration de nouvelles méthodes et critères afin d'améliorer les résultats obtenus.

Références

Références

[1] S. Dawson-Haggerty, A. Tavakoli and D. Culler, "Hydro: A Hybrid Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Gaithersburg, MD, 2010, pp. 268-273.

[2] K. Fekih & A.Gorine, "mise en place d'une application d'agrégation des données dans un réseau de capteurs sans fil sous la plateforme Contiki ", Mémoire de Master en informatique, Université de Tlemcen, Juin 2015.

[3] Yacine CHALLAL, Hatem BETTAHAR, Abdelmadjid BOUABDALLAH, «Les Réseaux de capteurs (WSN: Wireless Sensor Networks) », Rapport interne, Université de Technologie de Compiègne, France, 2008.

[4] Chee-Yee Chong Chee-Yee Chong and S P Kumar. "Sensor networks : evolution, opportunities, and challenges". Volume 91, pages 1247–1256. IEEE, 2003.

[5] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.

[6] S.Kabou. "État de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire de Licence, Informatique, Université de Bechar, 2010.

[7] Daniel MABELE MONDONGA, Etude sur les protocoles de routage d'un réseau sans fil en mode Ad Hoc et leurs impacts. "cas de protocoles OLSR et AODV", Institut supérieur d'informatique, programmation et analyse de Kinshasa - Ingénieur informaticien 2010

[8] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*, New Orleans, LA, 1999, pp. 90-100.

[9] B.Romdhani, "Exploitation de l'hétérogénéité des réseaux de capteurs et d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage", Thèse de doctorat, en informatique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon , juillet 2012.

[10] Cooja Simulator – Contiki, http://anrg.usc.edu/contiki/index.php/Cooja_Simulator, dernier accès Juillet 2017.

Liste des figures

Figure 1: Schématisation de la chaîne de collecte de données 4
Figure 2: Les composants d'un nœud capteur [3] 5
Figure 3: Exemple d'applications médicales 7
Figure 4: Applications domotiques 8
Figure 5: Application commerciale 8
Figure 6: Architecture d'un réseau de capteurs 9
Figure 7: Collecte de données à la demande 10
Figure 8: Collecte de données suite à l'occurrence d'un évènement 10
Figure 9: Classification des protocoles de routage dans les RCSF 15
Figure 10: Exemple illustrant la construction d'un DODAG [9] 23
Figure 11: Trafics supportés par le DODAG [9] 24
Figure 12: Architecture de Contiki 27
Figure 13: Pile protocolaire de Contiki [10] 28
Figure 14: Interface graphique de Cooja 29
Figure 15 : Consommation de l'énergie en fonction de la taille du réseau 31
Figure 16: PDR vs. Nombre de nœuds 32
Figure 17: Taux de perte vs. Nombre de nœuds 33
Figure 18: Evaluation du RPL amélioré en terme d'énergie 35
Figure 19: PDR dans RPL amélioré vs. Nombre de nœuds 35
Figure 20: Taux de parte dans RPL amélioré vs. Nombre de nœuds 36

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques de la machine utilisée pour les simulations 29
Tableau 2: Paramètres de simulation 30

Résumé

Les tendances récentes dans les réseaux de capteurs sans fil suggèrent une convergence vers des réseaux IPv6. A cet effet, l'IETF a mis en place un groupe de travail pour élaborer la spécification d'un protocole de routage s'appliquant aux réseaux de capteurs sans fil multi-hop basés sur IPv6. Ce protocole de routage est RPL.

L'objectif principal du notre mémoire est d'évaluer les performances de RPL selon deux métriques de routage : ETX et l'énergie. Puis, proposer une configuration de RPL qui permet d'améliorer ses performances. Pour cela, nous avons combiné deux métriques pour combler les limites des métriques de routage considérées séparément.

Les résultats obtenus étaient prometteurs en termes de consommation d'énergie et du taux de paquets délivrés avec succès à la racine..

Mots-clés : Réseaux de capteurs, RPL, Routage, IPv6, Simulations, évaluation des performances.

Abstract

Recent trends in wireless sensor networks suggest convergence to IPv6 networks. To this end, the IETF has set up a working group to develop the specification of a routing protocol for IPv6-based multi-hop wireless sensor networks. This routing protocol is RPL.

The main objective of our paper is to evaluate the performance of RPL according to two routing metrics: ETX and energy. Then, we propose a configuration of RPL which allows to improve its performance. To do this, we have combined two metrics to fill the limits of the routing metrics considered separately.

The results obtained were promising in terms of energy consumption and the rate of packages successfully delivered to the root.

Keywords: Wireless sensor networks, RPL, Routing, IPv6, Simulations, Evaluation of performance.

ملخص

تشير الاتجاهات الحديثة في شبكات الاستشعار اللاسلكية تقارب نحو شبكات الإصدار IPv6. تحقيقا لهذه الغاية، وضعت IETF فريق عمل لتطوير مواصفات بروتوكول توجيه ينطبق على شبكات الاستشعار اللاسلكية القائمة على الإصدار IPv6 متعددة القفزات .هذا البروتوكول التوجيه هو RPL.

الهدف الرئيسي من مذكرتنا هو تقييم أداء RPL في مقياسين التوجيه ETX :والطاقة .ثم اقتراح RPLالتكوين الذي يحسن الأداء .لهذا، قمنا بالجمع بين مقياسين لملء القيود المفروضة على مقاييس التوجيه بصورة منفصلة.

وكانت النتائج جيدة من حيث استهلاك الطاقة ومعدل الحزم بنجاح إلى جذر .

الكلمات المفتاحية الاتجاهات الحديثة في شبكات الاستشعار اللاسلكية، بروتوكولRPL ،توجيه، IPv6 محاكاة تقييم أدائه.