

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



Université Saad Dahlab Blida 1
Faculté des Sciences
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : MI

Filière : Informatique

Spécialité : Système Informatique et Réseaux

**Routage avec Contraintes dans le Protocole RPL dans le contexte des
Smart Grids.**

Sonia MEDBAL
Yasmina TACHET

Encadreur : Mr. Nadir BOUCHAMA (CERIST)

Promoteur : Mr. Mohamed OULD KHAOUA

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce projet. Ensuite, nous tenons à exprimer notre gratitude envers notre encadreur, M. Nadir BOUCHAMA, ainsi que notre promoteur, M. Mohamed OULD-KHAOUA, pour leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de cette période de travail.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'évaluer notre travail et en le complétant par leurs suggestions.

Enfin, nous souhaitons également remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Nous tenons à dédier notre travail à plusieurs personnes qui ont joué un rôle essentiel dans sa réalisation :

À nos chers parents et grands-parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études.

Nous tenons également à dédier ce mémoire à nos sœurs bien-aimées. Leur soutien constant, leur encouragement et leur amour inconditionnel.

À tous nos amis et collègues qui étaient là pour nous.

Résumé

Ce projet se concentre sur l'application de RPL dans la Smart Grid, un réseau électrique intelligent. L'objectif est d'optimiser l'utilisation de l'énergie totale en exploitant les fonctionnalités offertes par RPL. La Smart Grid intègre des technologies de l'information et de la communication pour une meilleure gestion de l'énergie. RPL est conçu pour les réseaux à faible consommation d'énergie, permet un routage efficace des données en minimisant la consommation d'énergie. Le projet propose une approche innovante pour améliorer les performances énergétiques de la Smart Grid en utilisant RPL et une fonction objective adaptée. Des simulations et des expérimentations démontrent l'efficacité de cette approche. Ce travail ouvre des perspectives pour une gestion plus durable de l'énergie dans les réseaux électriques intelligents.

Mots clés: Grilles électriques intelligentes, internet des objets, routage avec contraintes, RPL, cooja.

Abstract

This project focuses on the application of RPL in the Smart Grid. The objective is to optimise the use of total energy by exploiting the functionalities offered by RPL. The Smart Grid integrates information and communication technologies for better energy management. RPL is designed for low-energy networks, enabling efficient routing of data while minimizing energy consumption. The project proposes an innovative approach to improving Smart Grid energy performance using RPL and an adapted objective function. Simulations and experiments demonstrate the effectiveness of this approach. This work opens up prospects for more sustainable energy management in Smart Grids.

Key words: Smart grids, Internet of things, Constrained routing, RPL, Cooja .

ملخص

في الشبكة الذكية. الهدف هو تحسين استخدام الطاقة الإجمالي عن طريق استغلال RPL هذا المشروع يركز على تطبيق الشبكة الذكية تدمج تكنولوجيا المعلومات والاتصالات لإدارة الطاقة بشكل أفضل. تم تصميم RPL الوظائف التي يقدمها للشبكات ذات الطاقة المنخفضة، مما يتيح توجيه البيانات بكفاءة وتقليل استهلاك الطاقة. يقترح المشروع نهجاً مبتكراً RPL ووظيفة هدف كيفية. تظهر المحاكاة والتجارب فعالية هذا النهج. يفتح هذا RPL لتحسين أداء الطاقة في الشبكة الذكية باستخدام العمل آفاقاً لإدارة الطاقة أكثر استدامة في الشبكات الذكية.

كلمات مفتاحية: الشبكات الذكية، إنترنت الأشياء، توجيه مقيد،

Table des matières

Introduction générale	13
Chapitre 01 : l'Internet des Objets.....	13
1.1 C'est quoi un objet?	16
1.2 Internet des objets	16
1.3 Caractéristiques d'un système IoT	18
1.3.1 Inter-connectivité	18
1.3.2 Services liés aux objets connectés	18
1.3.3 Hétérogénéité	18
1.3.4 Changements dynamiques	18
1.3.5 Énorme échelle.....	19
1.3.6 Sécurité	19
1.3.7 Connectivité.....	19
1.3.8 La détection	19
1.3.9 La communication.....	19
1.4 Les réseaux de l'IoT.....	21
1.4.1 Les réseaux à faible consommation et à perte (<i>LLN</i>)	21
1.4.2 Les réseaux de capteurs sans fils (<i>WSN</i>)	21
1.4.3 Les réseaux maillés (<i>WMN</i>)	21
1.5 Modèles d'architectures d'un nœud dans l'Internet des Objets.....	22
Chapitre02: Routage avec contraintes dans RPL	16
2.1 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (<i>RPL</i>)	24
2.2 Construction et maintenance des DODAGs	27
2.3 Diagramme de séquence protocole RPL.....	28
2.4 Pile de protocoles RPL	29
Les contraintes dans le protocole RPL	30
Chapitre 03: Routage dans le contexte des Smart grid.....	24
3.1 Grilles électriques intelligentes (Smarts grids).....	33
3.2 Réseaux de communication du Smart Grid.....	34
3.3 Réseau traditionnel et réseau intelligent	35
3.4 Les Avantages des Smart Grids.....	36
3.5 Défis et challenges de la smart grid	36
3.6 Contraintes du protocole rpl dans le contexte des smarts grids.....	37
3.7 Travaux connexes.....	37
3.7.1 RPL vs AODV	37
3.7.2 RPL vs GEO-ROUTING.....	37

3.7.3	Modified-RPL.....	38
3.8	Routage dans IoT Smart Grid	38
Chapitre04 : SMART_RPL, une nouvelle approche améliorée d'une solution basée sur RPL dans les smart grid		33
4.1	Calcul de l'énergie résiduelle	42
4.2	Message DIO modifié	43
4.3	Construction et maintenance du DODAG	43
4.4	Métriques de performance	44
4.5	Outils de la simulation.....	45
4.5.1	Contiki	45
4.5.2	Détails de l'implémentation du RPL	47
4.5.3	Implémentation SMART_RPL	47
Chapitre 05 : Évaluation de performances de SMART_RPL.....		42
5.1	Configuration du réseau.....	53
5.2	Paramètres de simulation	54
5.3	Evaluation de performance	56
Conclusion générale et perspectives		62

Table des figures

Figure 1. 1 Évolution de l'IoT avec le temps.....	17
Figure 1. 2 Applications d'IoT	18
Figure 1. 3 Modèles d'architectures d'un nœud IoT	22
Figure 2. 1 Un graphe acyclique dirigé (DAG) (à droite) par rapport à un graphe.....	25
Figure 2. 2 L'objet de base DIO.....	26
Figure 2. 3 Messages de contrôle.....	27
Figure 2. 4 Un exemple de construction des dodag.....	28
Figure 2. 5 Diagramme de séquence	29
Figure 2. 6 Piles de protocoles RPL	29
Figure 3. 1 Réseau intelligent (Mitsubishi Electric 2013).....	34
Figure 3. 2 Mapping des smart grid communication networks (SGCNs) sur la couche communication du smart grid architectural model (SGAM).	35
Figure 4. 1 Message DIO modifié.....	42
Figure 4. 2 Opération d'un routeur DODAG	43
Figure 4. 3 L'interface de simulateur Cooja	46
Figure 4. 4 Représentation des fichiers modifiés	48
Figure 4. 5 Déclaration de la nouvelle métrique dans rpl.h.....	48
Figure 4. 6 Changement de métrique dans rpl-conf.h.....	48
Figure 4. 7 Modification rpl-icmp6.c.....	49
Figure 4. 8 L'ajout de l'indicateur de type "RPL_DAG_MC_TOTALENERGY" au tampon dans le fichier rpl-icmp6.c.....	49
Figure 4. 9 SMART_RPL.....	50
Figure 4. 10 Calcul de la consommation d'énergie totale.....	50
Figure 5. 1 Configuration du réseau RPL.....	54
Figure 5. 2 Topologie aléatoire de 50 nœuds.	56
Figure 5. 3 La consommation énergétique moyenne de tous les nœuds.	57
Figure 5. 4 Diagramme à colonnes PDR.....	58
Figure 5. 5 : Débit SMART_RPL vs. ETX.....	59
Figure 5. 6 : Energie consommée du nœud voisin 16 avec la nouvelle fonction objective (SMART_RPL).....	59
Figure 5. 7 : Energie consommée du nœud voisin 16 avec Rpl standard	60

Liste des tableaux

Tableau 3. 1 Comparaison des caractéristiques du réseau traditionnel avec le réseau intelligent	35
Tableau 3. 2 Évaluation des performances des protocoles de routage	38
Tableau 5. 1 Paramètres de simulation	55
Tableau 5. 2 La consommation d'énergie moyenne des nœuds.....	57

Liste Abréviations

6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AODV	Ad-hoc On demand Distance Vector
DAG	Directed Acyclic Graph
DAO	Destination Advertisement Object
DAO-ACK	Destination Advertisement Object Acknowledgement
DIS	DODAG Information Solicitation
DODAG	Destination Oriented Directed Acyclic Graph
ETX	Expected Number of Transmissions
EVs	Electric Vehicles
FFD	Full-Function Device
HAN	Home Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ICMPv6	Internet Control Message Protocol version 6
IoT	Internet of things
IPV6	Internet Protocol version 6
LLN	Low Power and Lossy Network
LPM	Low Power Mode
NAN	Neighbord area network
PAN	Personal Area Network (Réseau Personnel)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMU	Phasor Measurement Units
QOS	Quality of Service
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SG	Smart Grids
SGAM	Smart grid architectural model
SGCNS	Smart grid communication network
UDGM	Unit Disk Graph Radio Medium
WI-FI	Wireless Fidelity
WAN	Wide Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WSN	Wireless Sensor Network

Introduction générale

Le routage contraint par le protocole RPL revêt une importance cruciale pour les Smart Grids, qui sont des réseaux électriques intelligents intégrant les technologies de l'information et de la communication pour optimiser l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes électriques. Dans ces réseaux, une gestion énergétique efficace est fondamentale pour un fonctionnement optimal et la réduction des pertes d'énergie.

Le RPL est spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil à faible consommation énergétique et à faible débit de données, ce qui en fait un choix idéal pour les Smart Grids. Les contraintes sont diverses, notamment la nécessité de garantir la fiabilité du réseau et de minimiser la consommation énergétique des capteurs. Le RPL permet la mise en place de mécanismes de routage adaptatifs et évolutifs qui tiennent compte de ces contraintes spécifiques en utilisant une topologie en arbre pour organiser le réseau et faciliter la transmission de données entre les nœuds.

Le routage contraint dans le cadre du RPL joue un rôle crucial dans la mise en œuvre efficace des Smart Grids, en tenant compte des contraintes telles que la fiabilité et la gestion énergétique. Ainsi, il contribue à l'efficacité et à la durabilité de ces réseaux de distribution d'énergie intelligents.

La problématique de ce projet consiste à développer une version de RPL qui minimise la consommation de l'énergie et évaluer l'efficacité énergétique de RPL dans le contexte de la Smart Grid. Dans le but d'assurer cela, nous avons proposé une nouvelle fonction objectif pour SMART_RPL, qui utilise l'énergie totale comme métrique.

Organisation du rapport

La structure du rapport comprend cinq chapitres :

Chapitre 01 : Donne un aperçu détaillé de l'Internet des objets (IoT) et de ses divers concepts, tout en expliquant les notions fondamentales et les principales caractéristiques de l'IoT, ainsi que les contraintes qui en résultent.

Chapitre 02 : On va aborder le routage avec contraintes dans le protocole RPL, parler de son fonctionnement

Chapitre 03 : Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le cas des réseaux de capteurs dans les réseaux électriques intelligents et évaluation des performances.

Chapitre 04 : Dans ce chapitre on parle d'une nouvelle approche SMART_RPL qui se distingue en tant qu'approche améliorée de routage basée sur la consommation d'énergie spécifiquement conçue pour les Smart Grids.

Chapitre 05 : ce chapitre aborde l'évaluation des performances de la nouvelle approche, et la discussion des résultats obtenus de la simulation.

Nous terminons le mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives de travail.

Chapitre 01 : l'Internet des Objets

Introduction

L'Internet des objets (IoT) est l'un des concepts tendance dans le domaine des technologies de l'information. L'Internet des objets transformera au futur les objets du monde réel en objets virtuels intelligents. L'IoT est en train de devenir un élément clé de la transformation numérique et peut avoir un impact considérable sur de nombreux secteurs, tels que la santé, l'industrie, l'agriculture et la maison intelligente.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur l'Internet des objets en donnant une présentation de l'Internet des objets et tout ce qui s'y rapporte.

1.1 C'est quoi un objet?

Un objet est une entité physique (un livre, une voiture, une machine à café électrique, les caméras de sécurité ou les appareils médicaux, etc.), qui permet d'interagir et de communiquer entre des participations actifs en échangeant des données et des informations relatives à l'environnement, tout en réagissant de manière autonome aux événements réels [4]; Dans le contexte spécifique de l'Internet des objets, quelle que soit la mission, Cet objet possède au moins un identifiant unique attaché à une identité [5] exprimant d'une part ses propriétés imperturbables (type, couleur, poids, etc.) et d'autre part son état, c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques qui peuvent évoluer dans le temps (position, niveau de batterie, etc.).

1.2 Internet des objets

L'Internet des objets (IoT) est « un réseau qui relie et combine les objets avec l'Internet, en suivant les protocoles qui assurent leur communication et échange d'informations à travers une variété de dispositifs. » [1]

L'IoT peut également être défini comme «un réseau de réseaux qui permet, par le biais de systèmes d'identification électronique unifiés, et de dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques, ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter des données de manière transparente entre le monde physique et le monde virtuel. » [2]

Il existe plusieurs définitions sur le concept de l'IoT, dans le cadre de notre travail, nous adoptons la définition proposée dans [14] qui est :

Il existe plusieurs définitions sur le concept de l'IoT, mais la définition la plus pertinente à notre travail de recherche est celle proposée par la revue Sensors qui ont défini l'IoT comme « L'évolution des dispositifs informatiques et de l'informatique omniprésente a conduit au développement de l'Internet des objets (IoT). Cette technologie englobe plusieurs appareils aux fonctionnalités différentes qui peuvent être interconnectés dans le même environnement ou même dans des environnements distincts. » [3]

Avec le temps l'IoT a beaucoup évolué, cette évolution peut être illustrée par plusieurs phases comme le montre la figure 1.1

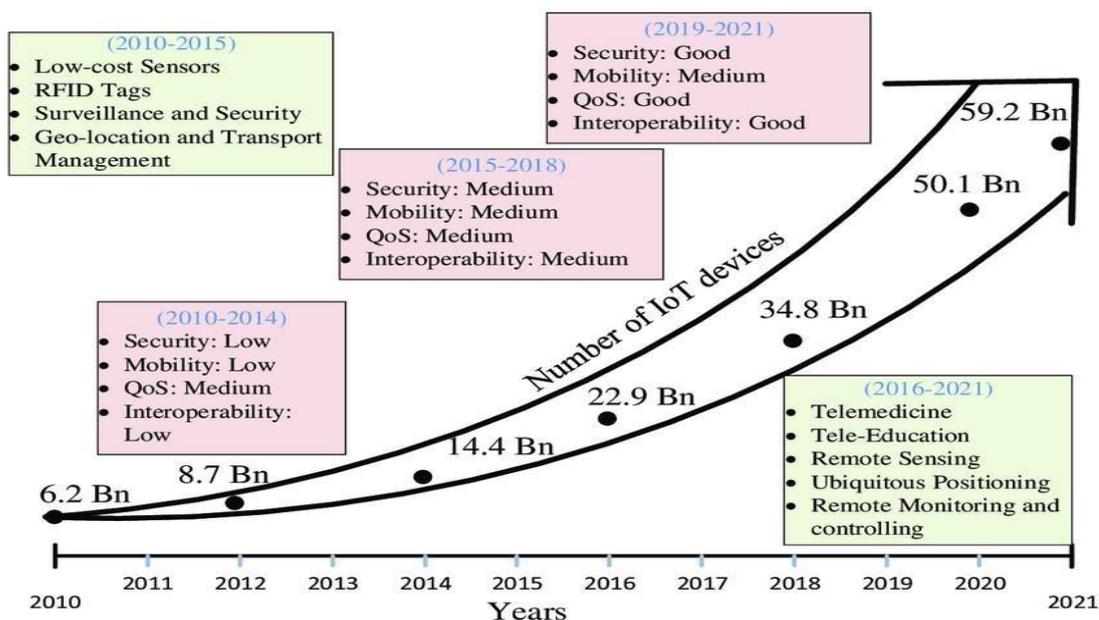


Figure 1. 1 Évolution de l'IoT avec le temps. [28]

L'objectif principal de l'Internet des objets (IoT) est de connecter les objets du monde réel à Internet, permettant ainsi à ces objets de communiquer entre eux et avec les personnes. Cela ouvre la voie à une multitude d'applications innovantes dans des domaines tels que la domotique, la santé, la ville intelligente, la logistique et la fabrication [6]

L'IoT vise à améliorer la qualité de vie (quality of life) des personnes en leur permettant de contrôler à distance les appareils ménagers, de surveiller la santé et le bien-être, de rendre les villes plus intelligentes et plus durables, et de rationaliser les processus industriels.

En fin de compte, l'IoT vise à créer un monde plus interconnecté, plus efficace et plus réactif, où les objets peuvent s'auto-gérer et les personnes peuvent être plus informées et plus impliquées dans leur environnement [6].

Il existe plusieurs domaines et environnements d'application qui seront touchés par l'émergence de l'Internet des objets. Les applications sont classées en quatre domaines d'application : (1) personnel et domestique ; (2) entreprise ; (3) services publics ; et (4) mobile. La figure 1.2 illustre les différentes applications de l'IoT personnel et domestique à l'échelle d'un individu ou d'une maison [4]

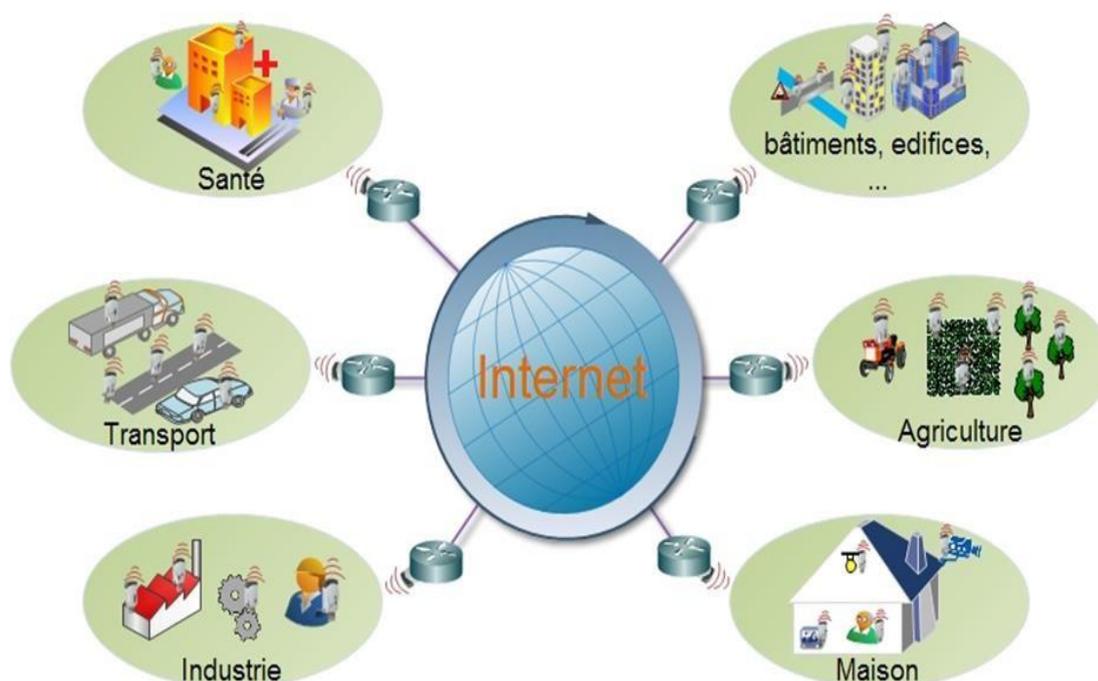


Figure 1. 2 : Applications d'IoT

1.3 Caractéristiques d'un système IoT

Les caractéristiques fondamentales de l'IoT sont les suivantes [4] :

1.3.1 Inter-connectivité

Les appareils sont connectés à l'internet ou à un réseau local via le Wi-Fi, le Bluetooth, le cellulaire ou d'autres technologies de communication.

1.3.2 Services liés aux objets connectés

L'IoT est capable de fournir des services liés aux objets dans les limites des contraintes, telles que la protection de la vie privée et la cohérence sémantique entre les choses physiques et leurs objets virtuels associés. Afin de fournir des services liés aux choses (i.e. objets) dans les contraintes sur les choses, les technologies dans le monde physique et le monde de l'information vont changer.

1.3.3 Hétérogénéité

Les périphériques de l'IoT sont hétérogènes en fonction des plateformes matérielles et des réseaux. Ils peuvent interagir avec d'autres appareils ou plates-formes de services via différents réseaux.

1.3.4 Changements dynamiques

L'état des dispositifs change dynamiquement, par exemple dormir et se réveiller, être connecté et / ou déconnecté ainsi que le contexte des dispositifs, y compris l'emplacement et la vitesse. De plus, le nombre d'appareils peut changer de façon dynamique [7].

1.3.5 Énorme échelle

Le nombre de périphériques qui doivent être gérés et qui communiquent entre eux sera d'au moins un ordre de grandeur supérieur à celui des 12 périphériques connectés à Internet. Encore plus critique sera la gestion des données générées et leur interprétation à des fins d'application. Cela concerne la sémantique des données, ainsi que la gestion efficace des données [8].

1.3.6 Sécurité

Comme nous gagnons des avantages de l'IoT, nous ne devons pas oublier la sécurité. En tant que créateurs et destinataires de l'IoT, nous devons concevoir des mécanismes assurant la sécurité. Cela inclut la sécurité de nos données personnelles et la sécurité de notre bien-être physique. La sécurisation des points de terminaison, des réseaux et des données qui les traversent signifie la création d'un paradigme de sécurité qui évoluera. [8]

1.3.7 Connectivité

La connectivité permet l'accessibilité et la compatibilité du réseau. L'accessibilité se met sur un réseau alors que la compatibilité fournit la capacité commune de consommer et de produire des données

1.3.8 La détection

La détection consiste à surveiller, contrôler l'environnement et collecter des données à partir d'objets associés au sein du réseau et à les envoyer à un système distribué ou centralisé pour l'analyser. Ces objets associés peuvent être des capteurs, RFID tag, des dispositifs de détection portables... etc. Ces derniers ne sont pas tous similaires en termes de portée et de volume de données à transférer. Ils doivent être capables de communiquer entre eux pour transmettre des données à une station de base et ils doivent être capables de communiquer dans des environnements difficiles. La détection peut être biométrique, biologique, environnementale, visuelle ou audible [9].

1.3.9 La communication

Après avoir détecté les informations provenant des capteurs et les avoir transmises à la plateforme IoT (l'entrepôt de données, une base de données ou un cloud), les dispositifs IoT nécessitent un moyen de communication pour un traitement ultérieur. Les technologies de communication de l'IoT connectent des objets hétérogènes entre eux pour fournir des services intelligents spécifiques. Parmi les protocoles de communication utilisés :

- **IEEE 802.11 (Wi-Fi)** : Connue sous le nom de Wireless-Fidelity (Wi-Fi), cette technologie utilise les ondes radio pour échanger des données entre des objets situés dans un rayon de 50 m. Elle est prévue pour transférer de gros débits. Il existe de nombreuses normes dérivées de celle-ci. Les deux dérivées les plus connues sont la norme 802.11b qui offre un débit de 11 Mbit/s dans la bande de fréquence de 2,4 GHz et la norme IEEE 802.11a qui offre un débit de 54 Mbit/s dans la bande de fréquence de 5,3 GHz [10].

- **IEEE 802.15.1 (Bluetooth)** : Ce dernier utilise des communications radio à faible puissance pour relier des téléphones, des ordinateurs et d'autres périphériques réseau sur une courte distance sans utiliser aucun type de fil de connexion afin de minimiser la consommation d'énergie et permettant un débit d'environ 1 Mbit/s [11].
- **3G/4G/5G** : Les technologies qui représentent les générations de normes de téléphonie mobile. Cette technologie vise à faciliter les usages interactifs sur les terminaux numériques mobiles comme les smartphones, les tablettes...etc. En permettant la transmission simultanée de la voix et de paquets de données. 3G/4G/5G ont une plus grande portée, mais demandent beaucoup d'énergie.[12]
- **IEEE 802.15.4 (Zigbee)**: C'est le standard de communication le plus répandu dans IoT , il est utilisé pour les réseaux personnels sans fil (PAN), qui comprennent des dispositifs caractérisés par un faible débit de données, une courte portée de communication et un faible coût. En fonction de leurs capacités, ces appareils peuvent être classés en appareils à fonction complète (FFD) et en appareils à fonction réduite (RFD). Les FFD sont capables de transmettre des trames pour d'autres appareils, tandis que les RFD n'ont pas cette capacité. Un FFD peut initier un PAN et agir en tant que coordinateur du PAN. Un coordinateur peut périodiquement diffuser des trames de balise afin que les RFD à proximité puissent le détecter et ainsi rejoindre le PAN, formant une topologie en étoile [11]. La conception de ce dernier a été réalisée pour permettre des communications de faibles portées en supportant des faibles débits 20 kbit/s, 40 kbit/s et 250 kbit/s. Au niveau de la couche physique, le dispositif matériel est constitué d'un émetteur/récepteur de radiofréquences et intègre les mécanismes de contrôle bas niveau tels que le contrôle de la qualité du signal et la détection de l'activité sur le canal où la gestion de la consommation énergétique dans ce niveau est optimisée. [13]
- **RFID (Radio Frequency Identification)**: Le terme RFID englobe toutes les technologies qui utilisent les ondes radio pour identifier automatiquement des objets ou des personnes. Il s'agit d'une méthode permettant de mémoriser et de récupérer des informations à distance grâce à une étiquette qui émet des ondes radio .Cette dernière est utilisé pour transférer les données des étiquettes à des objets, ou pour identifier les objets à distance. L'étiquette contient des informations stockées électroniquement pouvant être lues à distance [1]. Un système RFID assure deux fonctions basiques pour l'Internet des Objets qui sont l'identification et la communication RFID tag et RFID reading

1.4 Les réseaux de l'IoT

L'internet des objets rassemble différents types de réseaux, y compris les LLN, les WSN (réseaux de capteurs sans fil) et les WMN (réseaux maillés sans fil), qui sont examinés dans ce qui suit :

1.4.1 Les réseaux à faible consommation et à perte (LLN)

Pour désigner une classe de réseaux câblés et sans fil où les hôtes sont étroitement limités en ressources et en technologies de communication, les organismes de normalisation ont introduit le terme de réseaux à faible consommation et à perte (LLN) [15].

Bien que les limitations de ressources englobent aussi des réserves de puissance et des capacités de traitement et de stockage limitées, les technologies de communication sous-jacentes peuvent présenter des débits faibles, des caractéristiques de liaison asymétriques, une importante perte de données et une variabilité élevée de la perte de données ainsi que de courtes distances de communication. Les hôtes LLN procèdent de caractéristiques similaires. Cependant, des différences peuvent exister entre les capacités de calcul et de stockage des nœuds. Voici quelques domaines d'application des LLN: surveillance industrielle, automatisation du bâtiment, maison connectée, soins de santé, surveillance de l'environnement. [15]

1.4.2 Les réseaux de capteurs sans fils (WSN)

Les réseaux WSN (Wireless Sensor Networks) comprennent un certain nombre de nœuds capteurs (de quelques dizaines à des milliers), chaque nœud possède une capacité de traitement et peut contenir différents types de mémoires. Grâce à l'intégration de la détection d'informations, de l'informatique et de la communication sans fil, les nœuds de capteurs peuvent détecter les informations physiques, traiter les mauvaises informations et les signaler au puits. Le puits interroge à son tour les nœuds capteurs pour obtenir des informations. Au lieu d'envoyer les données brutes aux nœuds responsables de la fusion, les nœuds capteurs utilisent leurs capacités de traitement pour effectuer localement des calculs simples et ne transmettre que les données requises et partiellement traitées.[15]

Les WSN offrent plusieurs avantages, tels que le faible coût, la facilité de déploiement, l'évolutivité et l'adaptabilité à des conditions changeantes. Cependant, ils posent également plusieurs défis, tels que des ressources énergétiques et informatiques limitées, un trafic de données élevé et des risques de sécurité.

1.4.3 Les réseaux maillés (WMN)

WMN (*Wireless Mesh Networks*) sont des réseaux sans fil auto-organisés et auto-configurés de manière dynamique. Les nœuds du réseau établissent automatiquement un réseau ad hoc. Ils se caractérisent par deux catégories de nœuds : les routeurs maillés et les clients maillés, le routeur maillé contenant des fonctions de routage supplémentaires pour soutenir le réseau maillé et les clients maillés, ce dernier intègre des fonctions de routage complémentaires pour prendre en charge le réseau maillé et les clients maillés, et transmet le trafic vers le réseau maillé et les clients maillés. [16]

1.5 Modèles d'architectures d'un nœud dans l'Internet des Objets

La figure 1.3 présente une représentation schématique d'un nœud IoT, mettant en évidence ses différents composants.

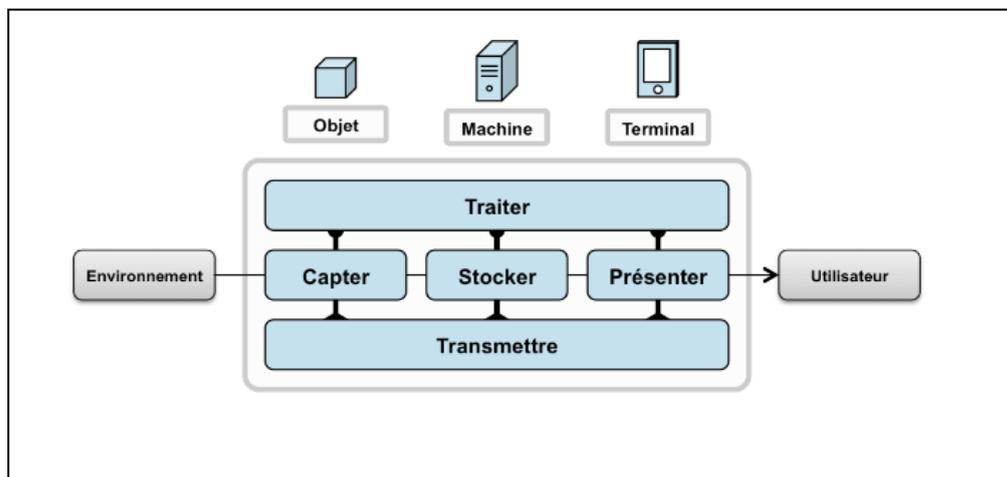


Figure 1. 3 : Modèles d'architectures d'un nœud IoT

La modélisation du nœud IoT dans cette figure montre les éléments clés qui le composent. On peut identifier plusieurs composants importants :

- **Capter** désigne l'action de transformer une grandeur physique analogique en un signal numérique.
- **Concentrer** permet d'interfacer un réseau spécialisé d'objet à un réseau IP standard (e.g. WiFi) ou des dispositifs grand public.
- **Stocker** qualifie le fait d'agréger des données brutes, produites en temps réel, méta taguées, arrivant de façon non prédictible.
- Enfin, **présenter** indique la capacité de restituer les informations de façon compréhensible par l'Homme, tout en lui offrant un moyen d'agir et/ou d'interagir.

Conclusion

L'IoT offre un potentiel énorme pour transformer notre monde en le rendant plus intelligent, plus connecté et plus efficace. Cependant, il est essentiel de prendre en compte les défis liés à la sécurité, à la confidentialité des données et à l'interopérabilité pour garantir un déploiement réussi et éthique de l'IoT. Avec des avancées continues et une adoption croissante, l'IoT promet de révolutionner nos vies et nos industries, apportant de nouvelles opportunités et des améliorations significatives dans de nombreux aspects de notre société.

Chapitre02: Routage avec contraintes dans RPL

Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le concept du routage avec contraintes dans RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*), qui est largement utilisé dans les réseaux basse consommation tels que les réseaux de capteurs sans fil et l'Internet des objets.

Les réseaux à faible consommation présentent des défis uniques en raison de leurs ressources limitées, de leur connectivité sporadique, de leur puissance restreinte et de leur bande passante limitée. Ces contraintes ont un impact significatif sur le routage des données et nécessitent des adaptations spécifiques pour garantir un routage efficace et fiable.

Le routage avec contraintes est un concept utilisé en informatique et en télécommunications pour décrire le processus de planification d'un itinéraire optimal pour le transfert de données entre différents points d'un réseau, tout en tenant compte de diverses contraintes.

2.1 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL)

] [2]

RPL est un protocole de routage spécialement conçu pour les réseaux basse consommation et à perte de paquets. Il a été développé pour permettre une communication efficace et fiable entre les appareils ayant des ressources limitées en termes d'énergie, de mémoire et de capacité de traitement. Son objectif principal est d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles dans le réseau, en minimisant la consommation d'énergie et en prolongeant la durée de vie des appareils alimentés par batterie.

L'architecture de RPL repose sur une structure en arbre. Le réseau est organisé en un ensemble de nœuds, où chaque nœud est soit un nœud racine, soit un nœud intermédiaire ou un nœud feuille. Le fonctionnement de RPL est basé sur deux principes fondamentaux : le contrôle de la topologie et le mécanisme de réparation des routes. Le contrôle de la topologie permet aux nœuds de construire et de maintenir une vue globale du réseau, en utilisant des informations sur la qualité du lien, la puissance du signal et d'autres métriques de routage. Pour établir et maintenir la structure en arbre, RPL utilise des métriques de routage pour évaluer la qualité des liens entre les nœuds. Les nœuds choisissent les meilleures routes en fonction de ces métriques, en tenant compte de l'objectif d'économie d'énergie.

Avant de comprendre RPL et la façon dont ces Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG) sont formés, nous devons comprendre certains termes de base et concepts clés qui sont au cœur de ce protocole de routage.

Directed Acyclic Graph “DAG”: le Graphe Acyclique Dirigé est une structure de données orientée, où les nœuds sont reliés par des arcs orientés et où il n'existe aucun cycle.

Racine DAG : la racine est le nœud de départ de tous les chemins dans le DAG. C'est le nœud qui ne possède pas de parent dans le DAG, mais qui peut avoir des enfants, tous les DAG doivent avoir au moins une racine DAG et tous les chemins se terminent à une racine DAG. La racine DAG est généralement désignée comme le "point de coordination" ou "point de contrôle" du réseau.

DODAG : le graphe Acyclique Dirigé orienté vers une destination est une structure de données conçue pour les réseaux de capteurs sans fil (WSN), La figure ci-dessous représente les deux types de graphes DAG et DODAG.

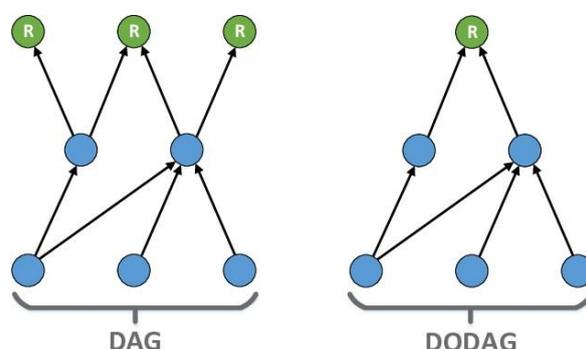


Figure 2. 1 : Un graphe acyclique dirigé (DAG) (à droite) par rapport à un graphe

Acyclique dirigé orienté (DODAG) avec un seul nœud racine (à gauche), tel que formé par RPL [1].

Racine DODAG : Une racine DODAG est la racine DAG d'un DODAG, il peut associer les routes dans le DODAG et peut faire la redistribution des routes DODAG

Up : Up fait référence à la direction des nœuds feuilles vers les racines DODAG, en suivant les arêtes DODAG.

Down : vers le bas fait référence à la direction des racines DODAG vers la feuille nœuds, dans le sens inverse des arêtes DODAG.

Rank: le rang d'un nœud définit la position individuelle du nœud par rapport aux autres nœuds par rapport à une racine DODAG. Le rang augmente dans le sens Bas et diminue dans le sens Haut.

DODAGID : Le DODAGID est une adresse IPv6 globale ou locale unique de la racine. Un nœud qui rejoint un DODAG devrait fournir une route hôte via un parent DODAG à l'adresse utilisée par la racine comme DODAGID.

RPL InstanceID : champ de 8 bits défini par la racine DODAG indiquant l'instance de topologie associée au DODAG, telle qu'elle a été apprise du DIO.

Fonction objective : La fonction objective et l'ensemble des métriques et contraintes annoncées d'un DAG déterminent comment un nœud sélectionne son ensemble voisin, son ensemble parent et ses parents préférés.

Il existe cinq messages de contrôle, qui forme l'arbre couvrant:

- **DODAG information Object (DIO):** Lors de la création du *DODAG*, le nœud racine envoie périodiquement des messages de contrôles appelés paquets d'objets d'information DODAG (DIO), il contient quatre paramètres importants "*RPLInstanceID*, *DODAGID*, *DODAGVersion*, *Rank*" chaque nœud qui reçoit le message DIO apprend l'ensemble de ses voisins et leurs valeurs de rang par exemple s'il est connecté ou non, s'il stocke ou non, et il annonce aux autres nœuds "s'ils sont intéressés à se joindre à nous, veuillez me le faire savoir". La figure 2.2 illustre l'objet de base DIO.

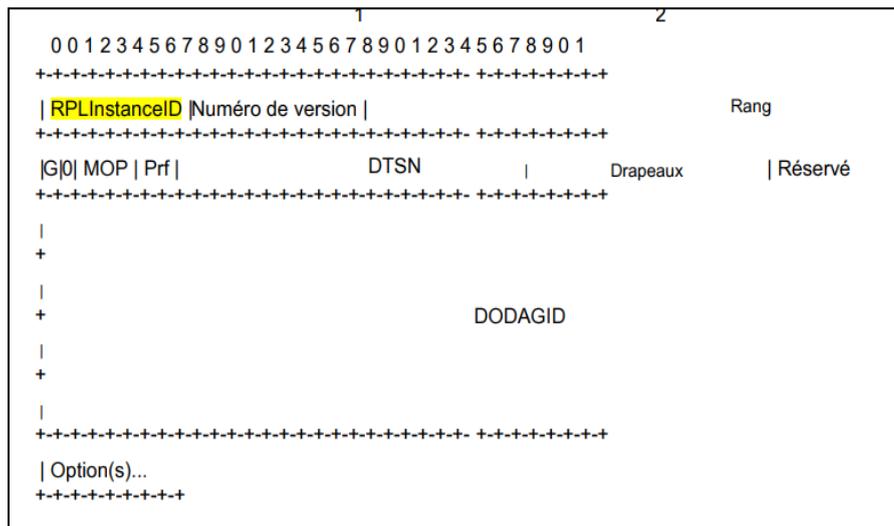


Figure 2. 2 : L'objet de base DIO

- **DODAG Information Sollicitation (DIS):** Le message de sollicitation d'informations DODAG (DIS) peut être utilisé pour solliciter un objet d'information DODAG auprès d'un nœud RPL, Le message qu'il envoie est donc le suivant : "Existe-t-il un DODAG ? " ce dernier est utilisé par le nœud qui souhaite rejoindre le DODAG.
- **DODAG advertisement Object (DAO) :** L'objet de publicité de destination (DAO) est utilisé pour propager les informations de destination vers le haut le long du DODAG. Ce message demande d'autoriser l'enfant à rejoindre un DODAG.
- **DAO-ACK :** Il s'agit d'une réponse envoyée par une racine ou un parent à l'enfant, qui peut être un Oui ou un Non.
- **Consistency check :** Contrôle de cohérence qui est utilisé pour vérifier le nombre de messages sécurisés et émettre des messages de défi-réponse pour la sécurité. [4]

La Figure 2.3 montre divers messages de contrôle.

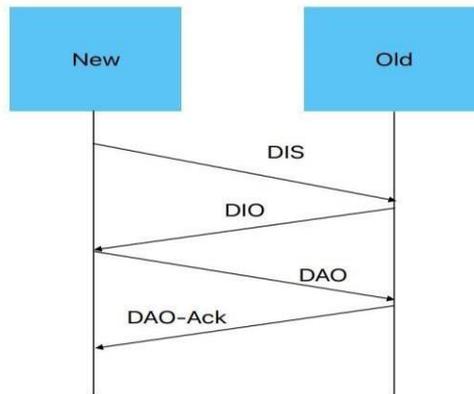


Figure 2. 3 Messages de contrôle.

2.2 Construction et maintenance des DODAGs

Les Directed Acyclic Graphs (DODAGs) sont utilisés pour former une structure hiérarchique de communication. La construction et la maintenance des DODAGs impliquent plusieurs étapes, ils sont réalisés grâce à des messages de contrôle ICMPv6 (DIS, DIO, DAO).

Supposons que nous avons 5 nœuds: 1, 2, 3, 4 et 5. et qu'ils doivent former un DODAG, nous suivant l'exemple ci-dessous :

1. Le nœud 1 commence par diffuser des DIO .Les autres nœuds qui reçoivent ces DIO tentent alors de se joindre au réseau indépendamment de leur distance par rapport au nœud 1. Ils apprennent également que leur distance respective par rapport au nœud 1 est de 1, 1, 3 et 5.
2. Les nœuds 2, 3, 4 et 5 envoient des messages DAO au nœud 1.
3. Le nœud 1 accepte ces demandes en répondant avec un message DAO-ACK
4. Un autre tour commence, et il débute par les nœuds qui sont les plus proches de la racine. Étant donné que les nœuds 2 et 3 ont un rang de 1, ils commencent à envoyer des messages DIO , le nœud 4 reçoit ces messages DIO et constate que sa distance par rapport aux nœuds 2 et 3 est respectivement de 1 et 2.
5. Comme 4 est plus proche de 2 et 5 est plus proche de 3 , 4 envoie donc DAO a 2 et 5 envoie DAO a 3 .
6. Pour finaliser la formation DODAG, 2 envoie un DAO-ACK a 4, et 3 envoie un DAOACK a 5. La figure 2.4 illustre un exemple de construction des DODAGs

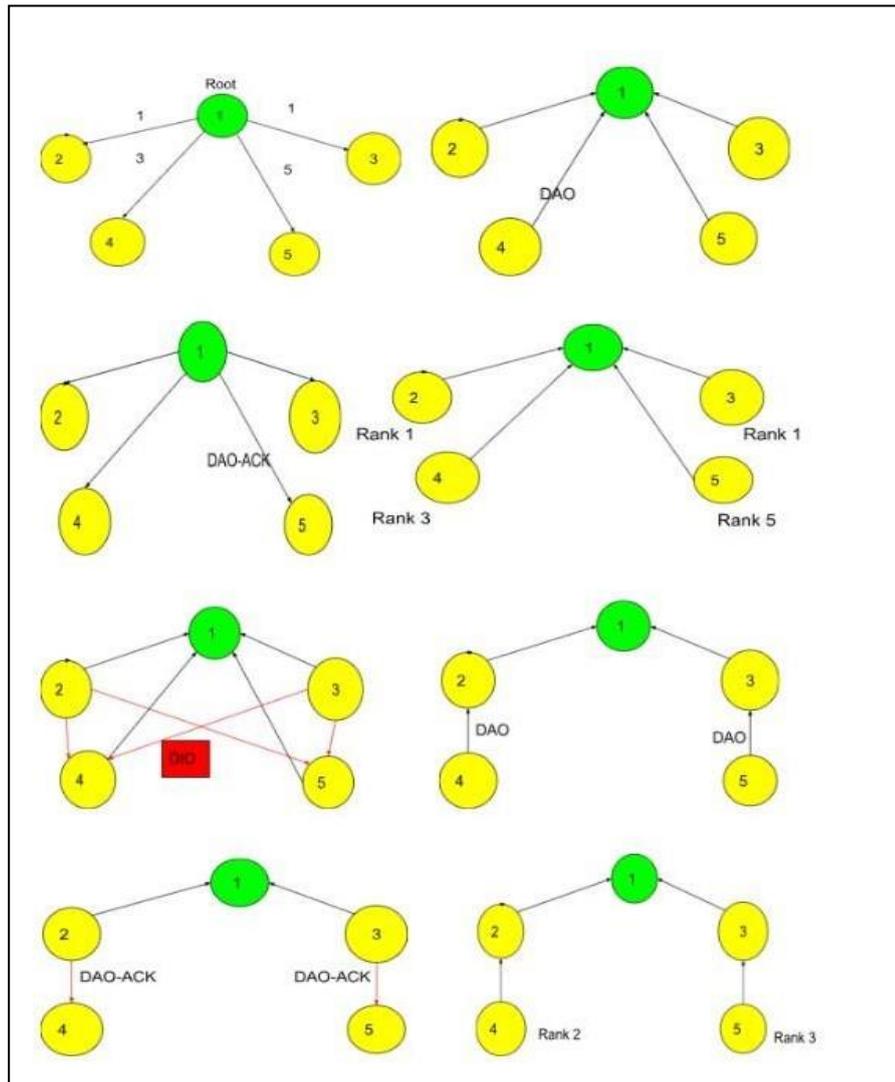


Figure 2. 4 Un exemple de construction des dodag

2.3 Diagramme de séquence protocole RPL

Tout d'abord, lorsque le nœud se réveille, il initialise RPL, réinitialise les temporisateurs appropriés et envoie un message DIS sollicitant une DIO de la part du voisin le plus proche. Un autre nœud recevra ce message DIS et répondra par un message DIO. Le premier nœud recevra à son tour le message DIO et traitera ce message afin de rejoindre le DAG de l'expéditeur DIO. Ce message afin de rejoindre le DAG de l'expéditeur DIO et de choisir le meilleur parent parmi les parents candidats. Et choisir le meilleur parent parmi les parents candidats. Une fois que le nœud décide d'adhérer à ce DAG, il choisit un parent préféré, selon l'OF proposé, et connaît sa route par défaut vers la racine du DAG. Route par défaut vers la racine du DAG. Il envoie ensuite un message DAO vers le haut pour s'annoncer dans le réseau et il sera acquitté par DAO ACK. Et sera acquitté par un DAO ACK. La figure 2.5 montre le diagramme de séquence du scénario ci-dessus [26].

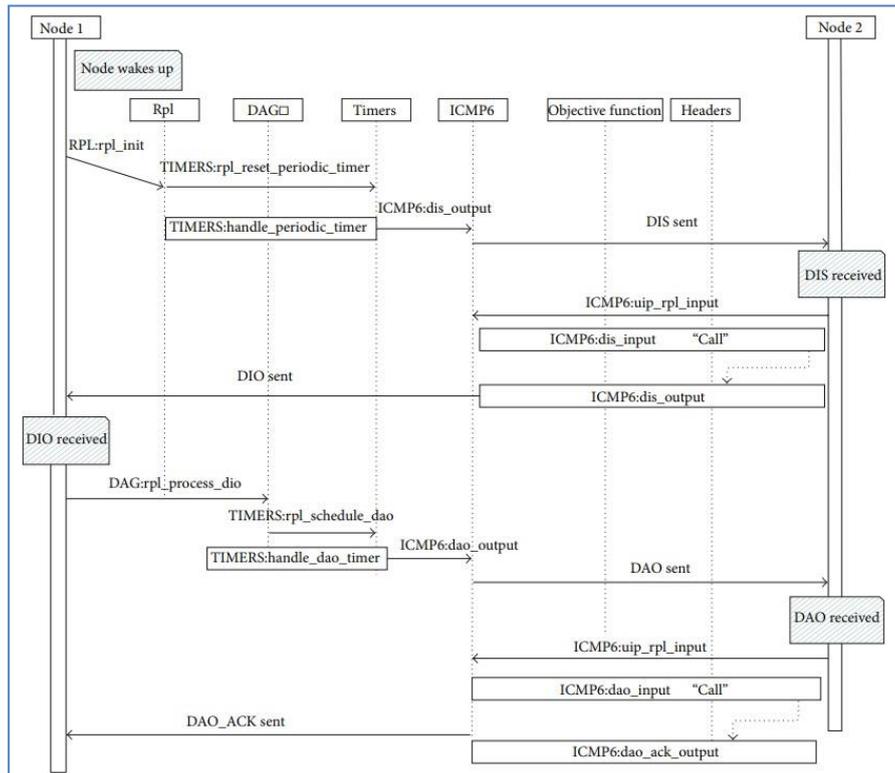


Figure 2. 5 Diagramme de séquence [26].

2.4 Pile de protocoles RPL

La pile de protocoles RPL est conçue pour optimiser la consommation d'énergie, la fiabilité et l'évolutivité des réseaux à faible consommation d'énergie. Elle offre des fonctionnalités de routage robustes et adaptatives pour prendre en charge les exigences spécifiques des réseaux à faible puissance et à perte de paquets. La figure 2.6 illustre les piles RPL.

Application Layer	COAP	
Transport Layer	UDP	
Network Layer	IPv6	ICMPv6
	RPL	
Adaption Layer	6LoWPAN	
MAC Layer	IEEE802.15.4 MAC	
PHY Layer	IEEE802.15.4 PHY	

Figure 2. 6 Piles de protocoles RPL

- **Couche physique** : Cette couche est responsable de la transmission des données à travers le support de communication physique.
- **Couche liaison de données** : Cette couche assure la fiabilité de la transmission des données entre les nœuds voisins. Elle peut utiliser des protocoles tels que IEEE 802.15.4 pour les réseaux sans fil à faible consommation d'énergie.
- **Couche réseau** : C'est ici que RPL opère. RPL est généralement intégré à la couche réseau. Il gère la découverte des voisins, la construction de l'arbre de routage, la sélection des routes optimales et le maintien de la topologie du réseau.
- **Couche transport** : La couche transport est responsable de la gestion du transport fiable des données de bout en bout. Dans une pile de protocoles RPL, il peut être utilisé le protocole de transport UDP (User Datagram Protocol) pour les applications à faible latence.
- **Couche Application** : Au-dessus de la couche transport se trouvent les couches applicatives, qui sont spécifiques aux besoins du réseau. Cela peut inclure des protocoles tels que CoAP (Constrained Application Protocol) ou MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) pour la communication entre les appareils IoT.

Les contraintes dans le protocole RPL

RPL est conçu pour prendre en compte les contraintes de mémoire, de puissance, de connectivité et de topologie dans les réseaux basse consommation et à faible puissance. Voici quelques-unes des principales contraintes dans RPL :

- **Contraintes de mémoire** : Les nœuds dans un réseau LLN ont souvent des ressources limitées en termes de mémoire. Le RPL doit donc être conçu pour minimiser l'utilisation de la mémoire et utiliser des structures de données efficaces.
- **Contraintes de puissance** : Les nœuds dans un réseau LLN ont souvent des contraintes de puissance et doivent économiser de l'énergie pour prolonger leur durée de vie. Le RPL doit donc minimiser la consommation d'énergie lors de la transmission et de la réception de messages.
- **Contraintes de connectivité** : Les nœuds dans un réseau LLN peuvent avoir une connectivité intermittente ou instable, en raison de la nature sans fil et à faible puissance du réseau. Le RPL doit donc être conçu pour gérer les pertes de connectivité et pour trouver des routes alternatives vers la destination.

Chapitre02: Routage avec contraintes dans RPL

- **Contraintes de topologie** : Les réseaux LLN peuvent avoir des topologies complexes, telles que des réseaux maillés, en étoile ou hiérarchiques. RPL doit donc être capable de s'adapter à différentes topologies et de trouver des routes efficaces dans des environnements dynamiques.

Conclusion

Le routage avec contraintes dans RPL est une composante essentielle pour garantir un fonctionnement efficace et durable des réseaux basse consommation et à perte, en prenant en compte les contraintes spécifiques liées à l'énergie, la latence, la fiabilité et d'autres paramètres pertinents.

Chapitre 03: Routage dans le contexte des Smart grid

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le cas des réseaux de capteurs dans les réseaux électriques intelligents. Nous commençons par présenter le concept du réseau d'électricité intelligent et donner une définition du Smart grid, les réseaux de communication du SG et la différence entre réseau intelligent et traditionnel. Ensuite, nous nous focalisons sur les technologies de communication du SG et une comparaison entre les protocoles . Enfin, on conclut avec une évaluation des performances.

3.1 Grilles électriques intelligentes (Smarts grids)

La Smart Grid est un concept qui combine un groupe de technologies, de solutions client qui répond à plusieurs facteurs politiques et réglementaires. Smart Grid n'a pas de définition unique et évidente. On cite ci-dessous quelques définitions citées par la plate-forme technologique européenne, The Opportunity (*Département of Energy and Climate Change, Royaume-Uni*), le département américain de l'énergie respectivement.

La plate-forme technologique européenne (Commission européenne 2006) définit le Smart Grid comme suit : "Un Smart Grid est un réseau électrique qui peut intégrer intelligemment les actions de tous les utilisateurs qui y sont connectés - producteurs, consommateurs et ceux qui font les deux - afin d'assurer un approvisionnement en électricité durable, économique et sûr. [17]

Selon le département américain de l'énergie (*Department of Energy, US 2009*) : « Un réseau intelligent utilise la technologie numérique pour améliorer la fiabilité, la sécurité et l'efficacité (à la fois économique et énergétique) du système électrique de la grande génération, à travers les systèmes de distribution aux consommateurs d'électricité et à un nombre croissant de ressources de production et de stockage distribués.[17]

D'après les définitions mentionnées ci-dessus, Un réseau intelligent intègre les avantages des communications avancées et des technologies de l'information, La SG fournit des informations en temps réel et permet l'équilibre instantané de l'offre et de la demande sur le réseau électrique.

La **figure 3.1** montre une architecture du réseau intelligent proposée par "Mitsubishi Electric " en 2013

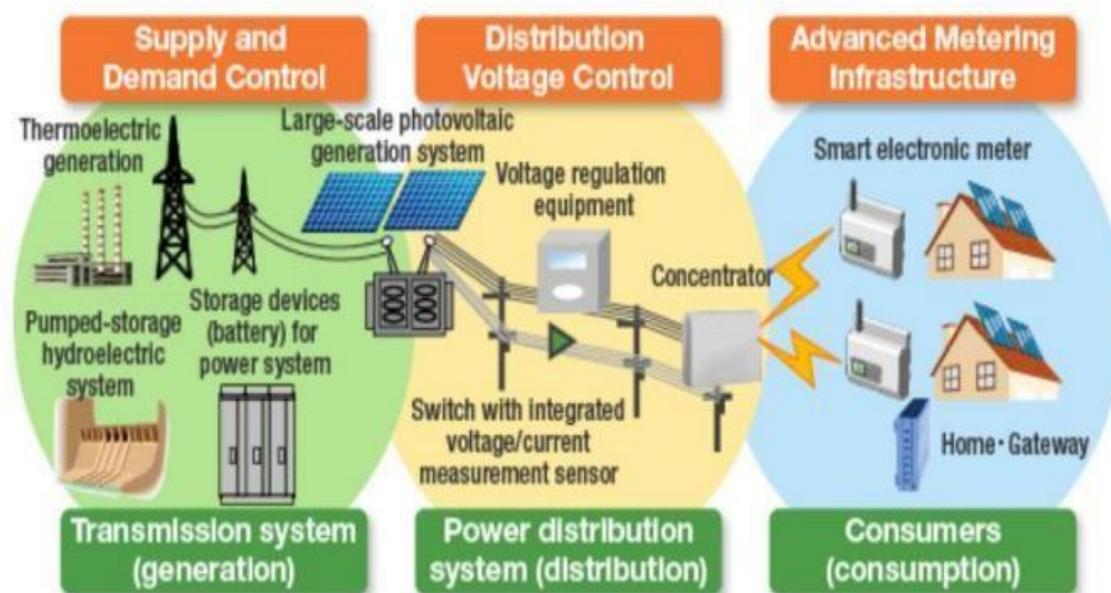


Figure 3. 1 Réseau intelligent (Mitsubishi Electric 2013)

3.2 Réseaux de communication du Smart Grid

Le réseau électrique actuel utilise un réseau de communication pour soutenir ses opérations. Ce dernier utilise une variété de technologies de communication, réseaux câblés et réseaux sans fil. Le réseau de communication existant est insuffisant, inflexible, et très coûteux. Les modifications du réseau existant sont difficiles et lourdes à réaliser et coûteuses en termes de conception matériel, et de programmation. Pour répondre à la demande future, un réseau de communication intégré est ajouté au réseau électrique pour le contrôle et pour permettre un fonctionnement fiable et sûr d'un réseau électrique bidirectionnel. Le SG ne va pas utiliser un seul type de réseau de communication, chaque réseau possède différentes topographies, différentes réglementations, Les SGs devraient être des réseaux multi-niveaux supportés par un maillage de différentes technologies de communication pour fournir un accès efficace et fiable aux différents composants du réseau dans des environnements divers. Principalement, il y a trois composantes de ce réseau multi-niveau qui peuvent déployer une variété de réseaux de communication, y compris avec ou sans fil, avec ou sans licence, privé ou commercial, fixe ou mobile, à bande étroite ou à large bande. Les réseaux domestiques (HAN, *Home Area Network*) diffèrent des réseaux de voisinage (NAN, *Neighborhood Area Network*) et des réseaux étendus (WAN, *Wide Area Network*).

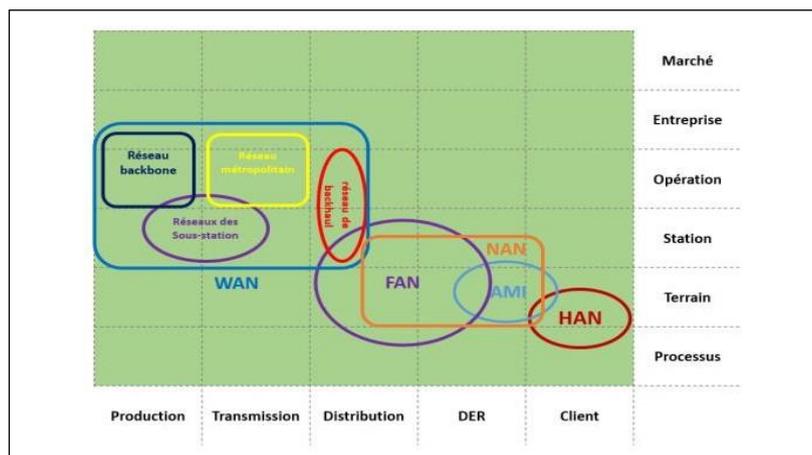


Figure 3. 2 : Mapping des smart grid communication networks (SGCNs) sur la couche communication du smart grid architectural model (SGAM).

3.3 Réseau traditionnel et réseau intelligent

De nombreux problèmes rendent le réseau traditionnel incapable de répondre avec compétence à la demande d'alimentation électrique constante.

Tableau 3. 1 Comparaison des caractéristiques du réseau traditionnel avec le réseau intelligent. [18]

Caractéristiques	Réseaux électriques traditionnels	Réseaux intelligents (Smart Grids)
Fonctionnement	Mécanisation	Digitalisation
Communication	Une communication à sens unique	Une communication à double sens
Détection/contrôle	Nombre limité de capteurs Système SCADA.	Capteurs du réseau. Systèmes avancés de Contrôle (metering, PMU, capteurs)
Consommation/Contrôle	La consommation n'est non comptabilisée	Les consommateurs peuvent contrôler leur consommation
Sécurité	Aucun besoin	Niveau de sécurité élevé (catastrophes naturelles et cyberattaques).
Stockage	Génération, transmission et distribution simultanément	Stockage de l'énergie avec PHEV, EVs.
Mesure de la consommation/ Auto guérison	Les agents qui notent consomment Intervention humaine.	Automatiquement, en temps réel

Ressources énergétiques	-Combustible fossile -Énergie renouvelable	-Combustible fossile -Énergie renouvelable -Énergie alternative générée Par les utilisateurs finaux
--------------------------------	---	--

3.4 Les Avantages des Smart Grids

- Les smart grids renforcent la sécurité des réseaux électriques en établissant un équilibre entre l'offre et la demande.
- Les smart grids améliorent l'efficacité énergétique globale .
- Les smart grids contribuent à limiter l'impact environnemental de la production d'électricité en réduisant les pertes et en favorisant une intégration plus efficace des énergies renouvelables.
- Les smart grids offrent également un avantage aux consommateurs en permettant :
[19]
 - ❖ De mieux gérer leur consommation d'énergie en fournissant des informations en temps réel sur leur consommation.
 - ❖ Bénéficier de tarifs plus bas lors des périodes de faible demande et ajuster leur consommation en conséquence pour économiser de l'argent.
 - ❖ facilitent l'intégration des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, dans le réseau électrique.
 - ❖ peuvent détecter les problèmes plus rapidement et les isoler afin d'éviter les pannes généralisées. Cela permet d'améliorer la fiabilité de l'alimentation électrique pour les consommateurs.

3.5 Défis et challenges de la smart grid

L'implémentation d'un réseau intelligent (smart grid) est confrontée à plusieurs défis majeurs, tout comme tout autre changement majeur. Voici les éléments clés des systèmes de réseau moderne : [20]

- La sécurité des données et des informations constitue une exigence primordiale dans les smart grids .
- La sécurité dans la chaîne d'approvisionnement est une préoccupation majeure compte tenu du grand nombre de dispositifs intelligents utilisés.
- La sensibilisation insuffisante des parties prenantes aux enjeux des réseaux intelligents constitue un défi important.

3.6 Contraintes du protocole RPL dans le contexte des Smart Grids

Le protocole RPL utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN) pour les Smart Grids doit relever plusieurs contraintes spécifiques. Il doit assurer la fiabilité de la transmission des données, répondre aux exigences de latence pour les applications en temps réel, minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs, s'adapter à la grande échelle des réseaux et garantir la sécurité des données sensibles. En optimisant le routage, le protocole RPL permet d'établir des routes fiables, à faible latence et économes en énergie, tout en assurant la scalabilité et la sécurité des Smart Grids.

3.7 Travaux connexes

3.7.1 RPL vs AODV

- **Application :** Acheminement du dernier kilomètre pour l'AMI
- **Simulateur:** Ns-2
- **Scénario:** Zone 300m X 300m ,1000 mètres de nœuds répartis de manière aléatoire avec une passerelle placée au centre.

Les effets shadowing sont pris en considération.

- **Discussion des résultats:** Efficacité du protocole Le délai moyen de bout en bout est plus faible pour RPL (160 ms) par rapport à AODV (1870 ms). Cela suggère que RPL peut fournir une meilleure efficacité de routage en termes de temps de transmission des données d'un nœud à un autre dans le réseau, et peut offrir une certaine robustesse en termes de délai de bout en bout par nœud, indépendamment de la distance par rapport à la passerelle. En revanche protocole AODV est sensible à la distance entre les nœuds et la passerelle, ce qui se traduit par une fluctuation du délai de bout en bout par nœud. Cela peut être dû à la nature de la découverte de route réactive d'AODV. [27]

3.7.2 RPL vs GEO-ROUTING

- **Application:** L'acheminement des données AMI des compteurs vers l'entreprise de distribution.
- **Simulateur:** Omnest.
- **Scénario:** les positions des noeuds ont été extraites d'un environnement réel et la simulation a été faite en envoyant séquentiellement 100 paquets du multipoint au point racine. la portée de chaque liaison radio a été calculée pour être d'environ 460 mètres, dans ce travail, RPL a utilisé la métrique ETX, des nœuds de 500 mètres ont été utilisés.
- **Discussion des résultats:** Le protocole RPL présente un délai moyen de bout en bout légèrement inférieur à celui du protocole de routage géographique. Cela suggère que RPL peut offrir une meilleure efficacité en termes de temps de transmission des données d'un nœud à un autre par rapport au protocole de routage géographique. [26]

3.7.3 Modified-RPL

- **Simulation :** Vingt nœuds et un concentrateur déployés dans deux bâtiments voisins .
Aucun des nœuds n'est relié en ligne de mire les uns aux autres.
Utilisation du matériel conforme à la norme IEEE 802.15.4 dans la bande de 2,4 GHz de données envoyées par chaque nœud toutes les 5 secondes.

- **Discussion des résultats:** Les nœuds situés à 4-5 sauts du concentrateur obtiennent le PDR le plus bas. Les nœuds qui servent de relais ont un faible PDR et un nombre élevé de retransmissions puisque le nez ne peut mettre en mémoire tampon qu'un seul paquet, ce qui permet d'augmenter la taille de la mémoire tampon. La latence de la découverte de route peut dépasser 20 secondes pour les nœuds situés à 3 sauts. [25]

3.8 Routage dans IoT Smart Grid

Le protocole de routage dans un réseau électrique intelligent (*smart grid*) est un élément crucial pour assurer une communication efficace entre les différents équipements du réseau. Le protocole de routage est responsable de la transmission des données et des commandes entre les différents nœuds du réseau, tels que les centrales électriques, les transformateurs, les compteurs intelligents, etc.

Il existe plusieurs protocoles de routage utilisés dans les réseaux électriques intelligents.

Le tableau 3.2 représente quelques évaluations des performances des protocoles de routage.

Tableau 3. 2 : Évaluation des performances des protocoles de routage.

Protocole	Avantage	Inconvénient	Métrique
RPL [20]	-Faible consommation d'énergie. -Flexible aux topologies variées. -Prend en charge QoS.	-La latence élevée. - Complexité. - Scalabilité	-Sur débit de trafic de contrôle. -Packet Delivery Ratio (PDR). -Latence du réseau (délai de bout en bout). -Consommation d'énergie.
DADR [21]	-Optimiser le routage des paquets de données au sein d'un réseau de réseaux intelligents, en tenant compte des	-Complexité metric Surcharge du réseau	-Énergie consommée -Latence Débit

	caractéristiques et des exigences uniques de ces systèmes.		
AODV [22]	<p>Routage à la demande: signifie que les routes ne sont établies que lorsqu'elles sont nécessaires.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible latence - Évolutivité :AODV réagit relativement rapidement aux changements topologiques du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> -Manque de fiabilité. -Coût énergétique élevé -Temps de convergence élevé 	<ul style="list-style-type: none"> -Le nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination
LOADng [23]	<ul style="list-style-type: none"> -Faible consommation d'énergie - Routage adaptatif - Simple et évolutif 	<ul style="list-style-type: none"> - Limité à des réseaux de petite taille - Faible fiabilité - Limité aux protocoles IPv6 	<ul style="list-style-type: none"> -La charge résiduelle e la batterie. -Taux de transmission -Le nombre de sauts
Geo-routing [24]	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction potentielle de la latence et une meilleure utilisation des ressources du réseau en sélectionnant des chemins plus courts ou plus efficaces en fonction des positions géographiques des nœuds. 	<ul style="list-style-type: none"> -Coût de déploiement. -Vulnérabilités à la sécurité et à la confidentialité. 	<ul style="list-style-type: none"> -Énergie consommée. -Disponibilité du réseau.

Modified-RPL [25]	-Optimisation de l'énergie. -Gestion de la qualité de service (QoS)	-Complexité. -Overhead de routage.	-Fiabilité. -Latence. -Débit.
--------------------------	--	---------------------------------------	-------------------------------------

Conclusion

Le routage RPL représente une solution puissante et adaptée pour le déploiement de réseaux de distribution intelligents dans le cadre de la Smart Grid. Grâce à ses fonctionnalités avancées telles que la gestion dynamique des nœuds, l'efficacité énergétique et l'évolutivité, il permet d'optimiser les performances du réseau, d'améliorer la fiabilité de la communication et de favoriser une utilisation efficace des ressources.

**Chapitre04 : SMART_RPL,
une nouvelle approche
améliorée d'une solution basée
sur RPL dans les smart grid**

Introduction

Les réseaux électriques intelligents ont révolutionné la manière dont l'électricité est distribuée, gérée et consommée. Ces réseaux permettent une gestion efficace et intelligente de l'énergie, offrant ainsi des avantages considérables en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité et de durabilité, au cœur des Smart Grids se trouvent le besoin crucial d'un routage efficace des données, capable de prendre en compte les contraintes énergétiques spécifiques de ces réseaux. C'est dans ce contexte que SMART_RPL se distingue en tant qu'approche améliorée de routage basée sur la consommation d'énergie spécifiquement conçue pour les Smart Grids. SMART_RPL s'appuie sur les fondements du RPL tout en introduisant des améliorations significatives pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques des réseaux électriques intelligents.

4.1 Message DIO modifié

Pour transporter des informations sur l'énergie consommée des nœuds, nous avons exploité le champ Options du paquet DIO conventionnel, comme indiqué sur la Figure ci-dessous ces champs nous permettent de connaître l'énergie consommée par le nœud parent candidat qui est sur 16 bits.

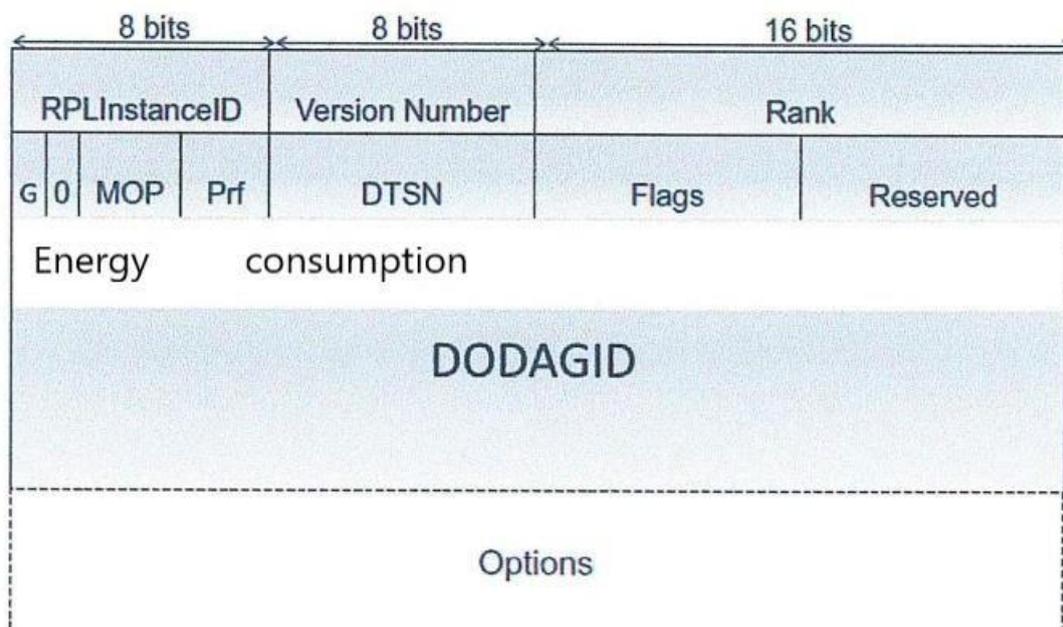


Figure 4. 1 Message DIO modifié

4.2 Construction et maintenance du DODAG

RPL est un protocole de routage vectoriel de distance proactif conçu pour les LLN . Il construit un DODAG en utilisant une certaine fonction objective qui répond aux exigences de l'application. Pour résumer, RPL s'appuie sur un message de contrôle DODAG Information Object (DIO) pour créer le DODAG. Ainsi, le point de départ commence lorsque le nœud racine (racine) diffuse le message DIO aux nœuds voisins. Dès que le nœud le plus proche reçoit le message, il peut décider de rejoindre ce DODAG . Si le nœud décide de se joindre, il ajoute l'expéditeur à la liste des parents candidats. Ensuite, le parent préféré, c'est-à-dire le saut suivant à la racine, sera choisi en fonction du rang de cette liste pour recevoir tous les trafics du nœud enfant. Après, il calcule son propre classement en fonction de la fonction objective sélectionnée.

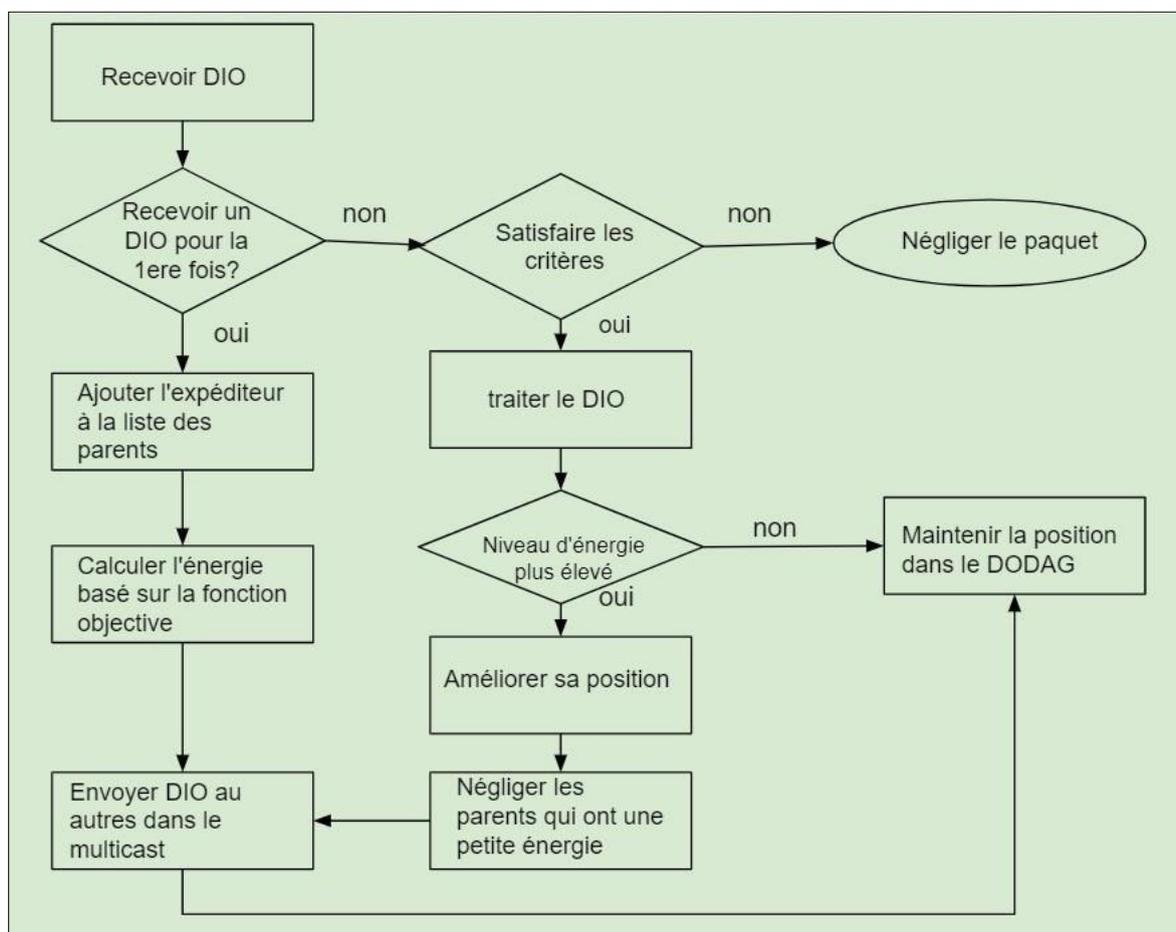


Figure 4. 2 Opération d'un routeur DODAG

4.3 Calcul de l'énergie résiduelle

L'énergie résiduelle fait référence à l'énergie restante ou disponible dans un système ou un composant après avoir effectué certaines opérations ou consommé une partie de l'énergie

initiale. Dans le contexte de la calculatrice de l'énergie résiduelle, il s'agit de déterminer la quantité d'énergie qui reste dans les nœuds d'un réseau après avoir effectué des tâches ou des transmissions de données. Cette mesure est importante pour évaluer l'autonomie ou la durée de vie restante des nœuds du réseau. [29]

L'énergie résiduelle d'un nœud est la différence entre l'énergie initiale $IniEnergy(i)$ et l'énergie consommée $EngCons(i)$, comme le montre l'équation (4.1).

$$ResEnergy(i) = IniEnergy(i) - EngCons(i) \quad (4.1)$$

Ici, $EngCons(i)$ est calculé selon l'équation (4.2)

$$EngCons(i) = E_{tx} + E_{rx} + E_{cpu} + E_{lpm} \quad (4.2)$$

$$R = \theta \left(\frac{ETX}{MaxETX} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{ResEnergy(i)}{IniEnergy(i)} \right) \quad (4.3)$$

Dans l'équation (4.3), R représente la condition pour sélectionner les nœuds parents préférés dans le RPL. $MaxETX$ fait référence à la valeur maximale du lien. θ représente la proportion entre la métrique ETX assignée et la mesure de l'énergie résiduelle. Comme le montre l'équation (4.4). [29]

$NowHop$ représente la valeur du saut nécessaire par le nœud candidat vers le nœud racine ; $MaxHop$ fait référence à la valeur de saut maximale de tous les nœuds candidats vers le nœud racine. θ est une valeur de poids ajustable. [29]

$$\theta = \frac{NowHop}{MaxHop} \quad (4.4)$$

4.4 Métriques de performance

Dans notre simulation, nous avons pris en compte quatre mesures pour l'évaluation.

- **Taux de livraison de paquets (PDR) :** Le taux de réception des paquets (PDR) peut être défini comme le rapport entre le nombre de paquets reçus par le destinataire et le nombre de paquets envoyés par l'émetteur, comme indiqué dans l'équation (4.5). Il est utilisé pour indiquer le niveau de fiabilité du réseau. [29]

$$PDR = \frac{K_{rx}}{S_{tx}} \quad (4.5)$$

K_{rx} représente le nombre total de paquets reçus et S_{tx} représente le nombre total de paquets envoyés.

- **Débit (Good put) :** Représente la quantité de paquets par laquelle les messages sont livrés avec succès. Il est calculé en utilisant l'équation (4.6)

$$Débit = \frac{\sum_{i=1}^N Pr}{T} \quad (4.6)$$

- Pr : paquet reçu.
- N : nombre total des paquets.
- T : temps de simulation.

Cette équation exprime le rapport entre le nombre de messages qui ont été transmis avec succès et la durée nécessaire pour les transmettre. Le débit est une mesure importante de la performance d'un système de communication, car il reflète l'efficacité et la capacité de transmission des messages.

- **Consommation moyenne d'énergie (MoyEC)**

MoyEC (en milliWatts) fait référence à la consommation d'énergie moyenne de tous les nœuds dans le réseau, comme le montre l'équation (4.7)

$$moyEC = \frac{\sum_i EC_i}{n} \quad (4.7)$$

Où:

- moyEC représente la consommation moyenne d'un nœud;
- n représente le nombre de nœuds;
- EC_i représente la consommation d'énergie du nœud i .

4.5 Outils de la simulation

4.5.1 Contiki

Le système d'exploitation Contiki est spécialement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il utilise la programmation C pour implémenter diverses simulations. Il est bien adapté aux microcontrôleurs avec des contraintes de mémoire. Il utilise certaines techniques de gestion de la mémoire afin de permettre son utilisation dans des appareils avec moins de mémoire. L'une de ces techniques est l'allocation dynamique. De plus, les appareils qui fonctionnent sur piles peuvent être utilisés de manière adéquate car ils ont la caractéristique où aucun événement ne conduit à un mode veille dans le système. Les nœuds peuvent vérifier le canal sur une base périodique pour les signaux radio. La mise en œuvre de systèmes en temps réel est possible avec la bibliothèque rtimer de contiki.

Le simulateur Cooja est utilisé pour simuler les réseaux de capteurs dans le système d'exploitation Contiki. Il est basé sur Java et fonctionne également avec des nœuds de capteurs écrits en C. L'objectif principal de ce simulateur est de prendre en charge les appareils à faible puissance qui sont utilisés dans le cadre de l'IoT [4]. Ceci permet de simuler les réseaux hétérogènes. Cooja permet l'émulation des plates-formes matérielles réelles

Chapitre04 : SMART_RPL, une nouvelle approche améliorée d'une solution basée sur RPL dans les smart grid

(Skymote, Z1mote, MicaZ ...etc.) et une simulation simultanée au niveau du réseau et du système d'exploitation. L'objectif principal de ce simulateur cooja est de prendre en charge les appareils à faible puissance qui sont utilisés dans le cadre de l'IoT [4].

La figure 4.3 montre l'interface de simulation qui se compose de cinq fenêtres : Network, Mote Output, Timeline, Simulation Control, Note.

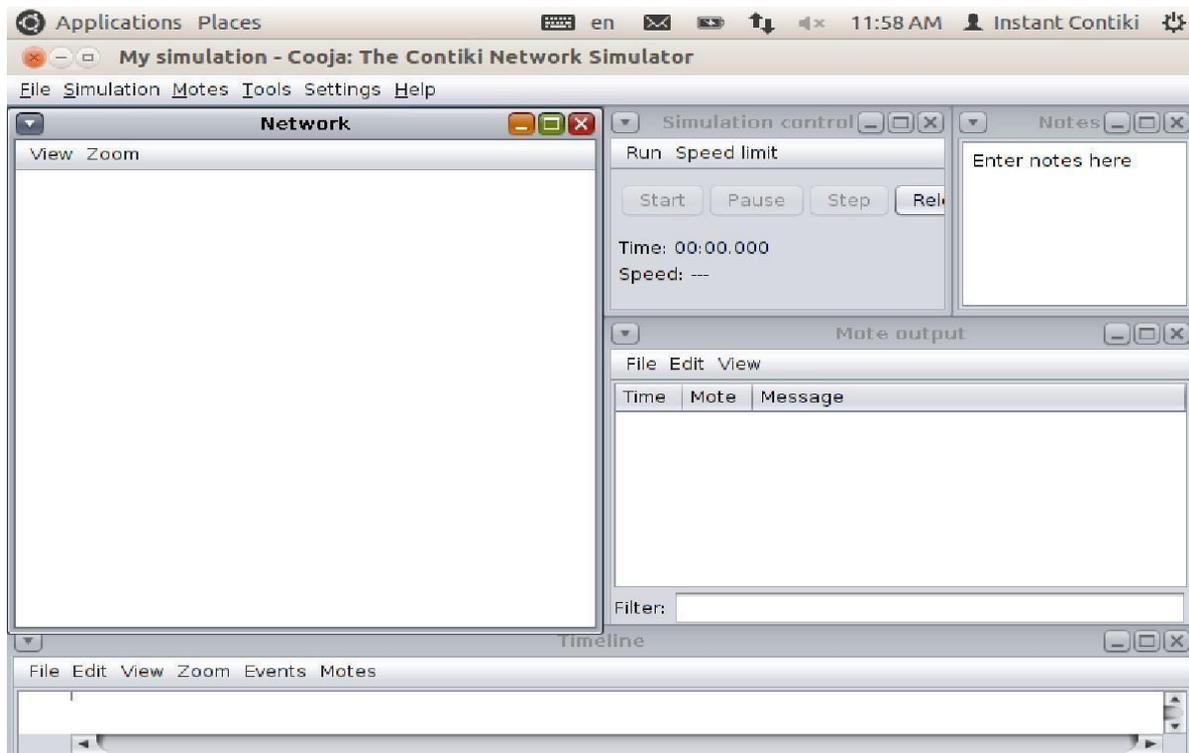


Figure 4. 3 L'interface de simulateur Cooja.

- **La fenêtre Network** :est la zone où les nœuds sont représentés par des icônes qui peuvent varier en fonction du type de capteur ou du modèle utilisé dans la simulation pour former la topologie . Les connexions entre les nœuds sont généralement représentées par des lignes ou des flèches.
- **La fenêtre Mote Output** : est une fenêtre d'affichage qui présente les sorties de chaque nœud moteur (mote) et les messages échangés entre eux et c'est l'endroit où nous obtenons le résultat de notre simulation.
- **La fenêtre Timeline** : est une fonctionnalité qui permet de visualiser les communications radio (transmission, réception, collision) et d'analyser les événements et les activités qui se produisent pendant l'exécution d'une simulation. Cette fenêtre affiche une représentation graphique du déroulement temporel de la simulation.
- **La fenêtre Note**: C'est pour prendre toutes les notes importantes concernant la simulation.
- **Simulation Control**: est une fenêtre qui permet de contrôler le déroulement de la simulation en cours. Elle offre des fonctionnalités pour démarrer, arrêter, mettre en pause, reprendre et gérer divers aspects de la simulation.

4.5.2 Détails de l'implémentation du RPL

RPL a été implémenté pour s'exécuter en tant que protocole de routage dans le système d'exploitation Contiki OS. Ce dernier intègre une version relativement stable de RPL. Le code source du routage RPL est situé dans le répertoire /core/net/rpl, et c'est dans ce module que nous nous concentrerons pour notre étude, car c'est là que nous implémenterons notre travail.

Le répertoire RPL comprend divers fichiers qui mettent en œuvre différentes fonctionnalités de RPL.

- **Makefile.rpl** : est utilisé pour la compilation et la construction du projet Cooja avec le support RPL.
- **Rpl.c** : Les fonctions RPL principales permettent de modifier les entrées de routage IPV6, telles que l'élimination de route ou l'ajout de route.
- **Rpl.h**: Déclarations d'API publiques pour ContikiRPL
- **Rpl-conf.h** : Une déclaration publique de configuration et une interface API pour ContikiRPL
- **Rpl-dag.c** : Contient les fonctions requises pour la manipulation du DAG
- **Rpl-ext-header.c** : contient les fonctions relatives aux en-têtes étendues de RPL.
- **Rpl-icmp6.c** : Il implémente les fonctions de message ICMP pour le RPL et intègre également des fonctions d'entrée pour gérer les messages de contrôle entrants.
- **Rpl-mrhof.c** : La fonction objective mrhof est incluse dans cette implémentation.
- **Rpl-of0.c** : La fonction Objective 0 de RPL, est une fonction de routage basée sur le saut.
- **Rpl-private.h** : Déclarations privées pour ContikiRPL .
- **Rpl-timers.c** : Elle assure l'envoi périodique des mises à jour.

4.5.3 Implémentation SMART_RPL

Afin d'utiliser la métrique de la consommation d'énergie, 5 fichiers ont été modifiés :

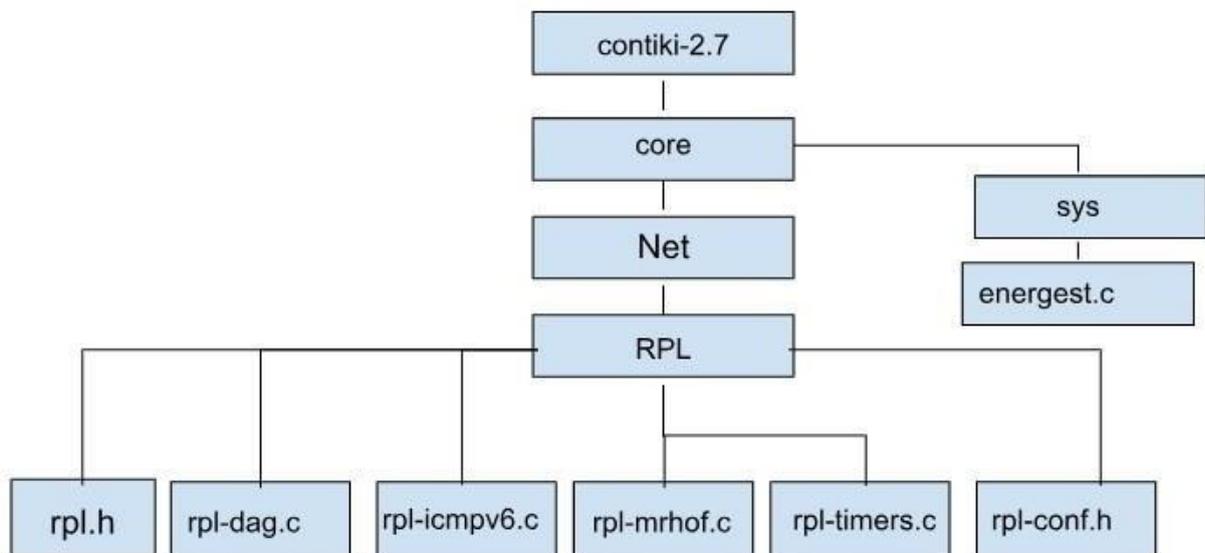


Figure 4. 4 Représentation des fichiers modifiés

rpl.h : Dans ce fichier nous avons déclaré la nouvelle métrique energie consommée qui est la métrique (9) comme présenté sur la figure ci-dessous

```
#define RPL_DAG_MC_LINK 8 /* Link Color */
#define RPL_DAG_MC_TOTALENERGY 9 /* Node Total Energy Consumption*/
```

Figure 4. 5 Déclaration de la nouvelle métrique dans rpl.h

rpl-conf.h : Dans ce fichier nous avons ajouté la configuration de la nouvelle métrique TOTALENERGY (l'énergie totale)

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

Figure 4. 6 Changement de métrique dans rpl-conf.h

rpl-icmp6.c : Dans ce fichier, il existe les deux fonctions responsables de l'envoi et de la réception de messages dio. Cette partie du code extrait la valeur de l'énergie totale à partir du tampon, puis affiche les différentes valeurs associées au mode de construction de DAG.

```
    dio.mc.obj.energy.energy_est = buffer[i+7];
} else if(dio.mc.type == RPL_DAG_MC_TOTALENERGY) {
    dio.mc.obj.total_energy = get16(buffer, i+6);
    PRINTF("RPL: DAG MC: type %u, flags %u, aggr %u, prec %u,
length %u, TotalEnergy %u\n",
(unsigned)dio.mc.type,
(unsigned)dio.mc.flags,
(unsigned)dio.mc.aggr,
(unsigned)dio.mc.prec,
(unsigned)dio.mc.length,
(unsigned)dio.mc.obj.total_energy);
} else {
    PRINTF("RPL: Unhandled DAG MC type: %u\n",
(unsigned)dio.mc.type);
    return;
}
```

Figure 4. 7 Modification *rpl-icmp6.c*

Cette partie du code ajoute l'indicateur de type "RPL_DAG_MC_TOTALENERGY" au tampon, insère la valeur de l'énergie totale dans le tampon, affiche la valeur de l'énergie totale, puis met à jour la position dans le tampon pour la prochaine opération.

```
    buffer[pos++] = instance->mc.obj.energy.energy_est;
} else if (instance->mc.type == RPL_DAG_MC_TOTALENERGY) {
    buffer[pos++] = 2;
    set16(buffer, pos, instance->mc.obj.total_energy);
    PRINTF("DIO Output total_energy %u\n", instance-
.obj.total_energy);
    pos += 2;
}
```

Figure 4. 8 L'ajout de l'indicateur de type "RPL_DAG_MC_TOTALENERGY" au tampon dans le fichier *rpl-icmp6.c*.

rpl-mrhof.c: MRHOF fonctionne avec des métriques qui sont additifs le long d'une route et la métrique utilisée est déterminée par les métriques annoncées par les messages DIO. Dans MRHOF, on a implémenté la nouvelle fonction objective SMART_RPL et ajouter la nouvelle

metrique TOTALENERGY.

```
#if RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_NONE
printf("--non\n");
return p->rank + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ETX
printf("--etx\n");
return p->mc.obj.etx + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ENERGY
printf("--ener\n");
return p->mc.obj.energy.energy_est + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_TOTALENERGY
printf("--enert\n");
return p->mc.obj.total_energy + get_total_energy_consumption();
#else
#error "Unsupported RPL_DAG_MC configured. See rpl.h."
#endif /* RPL_DAG_MC */
}
```

Figure 4. 9 SMART_RPL

energest.c: Cette fonction calcule la consommation totale d'énergie du nœud en utilisant différentes mesures de consommation d'énergie pour les types spécifiques de périphériques (CPU, LPM, transmission, écoute). Les valeurs mesurées et additionnées pour obtenir la consommation totale d'énergie.

```
uint16_t get_total_energy_consumption()
{
    uint32_t energy_consumed = 0;
    uint32_t cpu, lpm, transmit, listen;
    uint32_t time;

    energest_flush();

    cpu = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_CPU); // - last_cpu;
    lpm = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_LPM); // - last_lmp;
    transmit = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_TRANSMIT); // -
last_transmit;
    listen = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_LISTEN); // - last_listen;

    time = cpu + lpm;

    energy_consumed = 3L * ((cpu/RTIMER_ARCH_SECOND) * 2 + (lpm/
RTIMER_ARCH_SECOND) / 10 + (transmit/RTIMER_ARCH_SECOND) * 20 +
(listen/RTIMER_ARCH_SECOND) * 22);
}
```

Figure 4. 10 Calcul de la consommation d'énergie totale

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié attentivement comment mettre en œuvre la nouvelle fonction objectif et apporter des modifications à RPL pour tenir compte de la nouvelle métrique d'énergie totale. L'objectif était de permettre une utilisation efficace de cette métrique dans le cadre de RPL. Nous avons examiné les détails de son implémentation et les ajustements nécessaires pour l'intégrer correctement, afin d'optimiser la consommation d'énergie totale dans les Smart Grids .

**Chapitre 05 : Évaluation de
performances de
SMART_RPL**

Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté et implémenté la fonction objective SMART_RPL, qui a été conçue pour le but d'améliorer la métrique de consommation d'énergie dans le contexte des smart grid . Il s'agit d'une nouvelle fonction objective qui réduit la consommation énergétique globale du réseau et améliore la durée de vie et la stabilité du réseau. , l'implémentation des modifications apportées au RPL a été réalisée sous le simulateur Cooja.

Dans ce chapitre, nous présenterons une série de simulations réalisées à l'aide du simulateur Cooja. L'objectif principal de ces simulations est d'évaluer les performances de la fonction objective SMART-RPL dans des scénarios spécifiques dans le contexte des smart grids .Les simulations ont été conçues pour atteindre les objectifs suivants :

- Évaluer les performances de la nouvelle implémentation en fonction de certains paramètres de mesure.
- Comparer la nouvelle fonction objective avec OF0 du standard RPL.
- Conclure l'impact des modifications apportées au RPL.

5.1 Configuration du réseau

Afin de tester le comportement général de SMART_RPL par rapport à OF0, nous avons configuré un réseau dans le simulateur Cooja comprenant 20,40 et puis 50 nœuds clients et 1 nœud serveur qui agit en tant que racine du DODAG.

Le scénario du réseau est illustré dans la figure 5.1. Le nœud serveur utilisera un exemple d'application appelé "udp-server.c", tandis que tous les autres nœuds utiliseront l'exemple d'application "udp-client.c". Dans le but d'introduire une perte de signal dans le réseau sans fil simulé, nous utilisons l'Unit Disk Graph Medium (UDGM) de Cooja.

L'UDGM provoque des pertes de signal en fonction des distances relatives entre les nœuds dans le médium radio. Les paramètres de la simulation et de son environnement sont répertoriés dans le tableau 5.1.

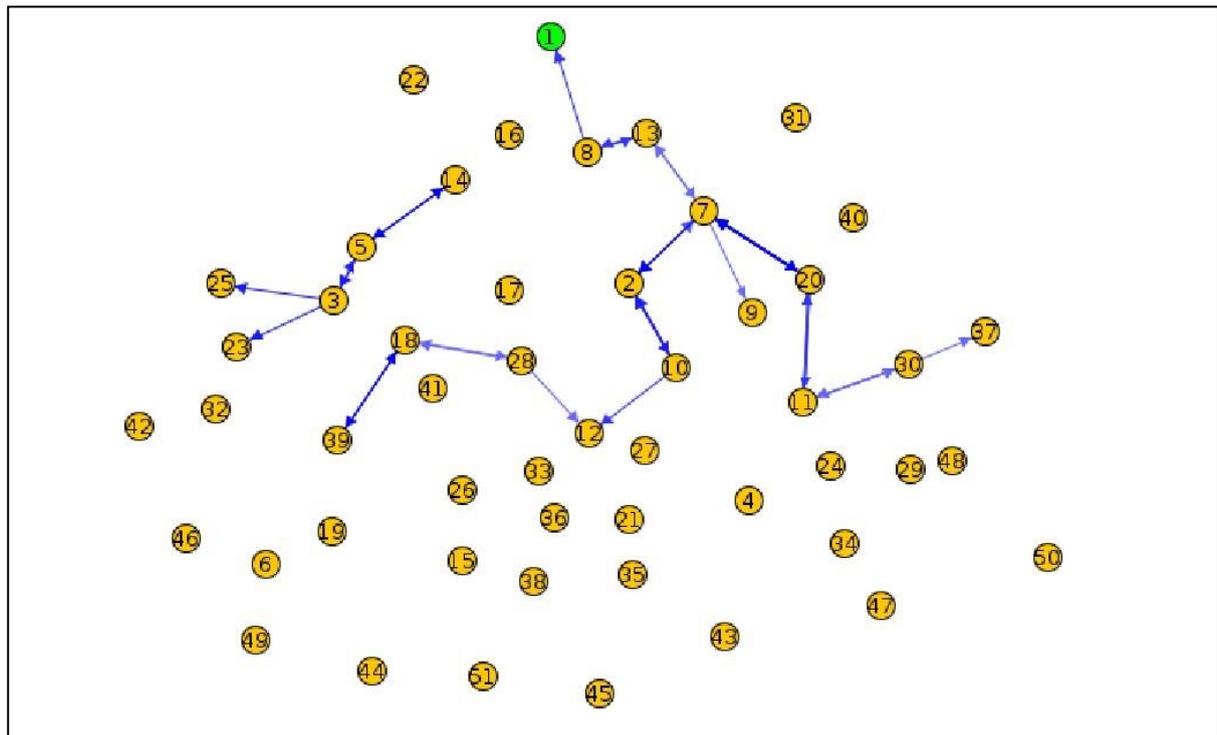


Figure 5. 1 Configuration du réseau RPL

La figure 5.1 présente la configuration du réseau RPL dans le simulateur Cooja, comprenant 50 nœuds clients et 1 nœud racine. Dans cette représentation, le nœud numéro 1 en vert est identifié comme la racine, tandis que les autres nœuds sont représentés par des cercles orange et agissent en tant que clients, envoyant des paquets vers le nœud racine. Le cercle vert de plus grande taille représente la zone de transmission, tandis que le cercle gris indique la zone de collision radio. Les chiffres en pourcentage indiquent le taux de réception des paquets.

Les simulations ont été effectuées à l'aide de plates-forme de nœud de capteur Skymote qui se caractérise par [3] :

- ❖ Mémoire : 48 KB ROM.
- ❖ Très faible consommation d'énergie et réveil rapide du sommeil.
- ❖ Interopérabilité avec de nombreux périphériques IEEE 802.15.4 différents.

5.2 Paramètres de simulation

Dans cette sous-section, nous exposons les paramètres de notre environnement de simulation, qui évolue progressivement sur un réseau de 20 à 50 nœuds répartis de manière aléatoire dans une zone de couverture de 81 000 m² (300 m x 270 m). Chaque nœud du réseau émet un paquet par seconde. Nous utilisons les indicateurs de performance suivants pour évaluer le fonctionnement des différentes fonctions objectives : Rx (Listen power) , Tx (Transmit power) et l'énergie totale consommée dans le réseau. Le tableau 5.1 récapitule les différents paramètres de simulation utilisés.

On suppose que :

- La batterie est toujours chargée.
- aucun nœud ne tombe en panne.

Tableau 5. 1 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Système d'exploitation	Contiki 2.7
Simulateur	Cooja
Temps de simulation	600000 ms (10 minutes)
Nombre de simulation	6
Taille de grille	300 x 270
Nombres de noeuds	20, 40,50
Fonction objective	OF0, SMART_RPL
Type de noeuds	Sky mote
Modèle de rapport (Ratio model)	UDGM
Type d'application	UDP
Zone de transmission	50m
Zone d'interférence	100m
Interval d'envoi de paquets de données	10 paquets/seconde
Couche réseau	RPL
Radio	CC2420

Le rapport de réception (RX) reflète la qualité de la transmission radio. La plage de transmission (TX) est définie à 50 mètres, tandis que la plage d'interférence s'étend jusqu'à 100 mètres. Nous avons effectué 6 simulations pour chaque objectif de fonction. Chaque simulation s'est déroulée sur une période de 10 minutes, impliquant consécutivement 20,40 et 50 nœuds.

- **OF0 (ETX)** : est une métrique utilisée dans RPL par défaut . Il mesure le nombre attendu de transmissions nécessaires pour envoyer un paquet avec succès d'un nœud source à un nœud destination. Le ETX est calculé en prenant en compte le taux de

perte de paquets et les délais de transmission sur les liens entre les nœuds. Il est utilisé par RPL pour sélectionner les routes les plus fiables et économes en énergie dans le réseau.

5.3 Evaluation de performance

Nous avons réalisé des simulations pour comparer notre fonction objective SMART_RPL à RPL STANDARD et vérifier s'il présente de meilleures performances en termes de débit, taux de livraison de paquets et Consommation moyenne d'énergie (MoyEC). Les deux fonctions objectives ont été testées et évaluées sur la base de 6 simulations en utilisant un scénario de test avec une topologie aléatoire où les nœuds sont placés de manière aléatoire, comme le montre la figure 5.2 ci- dessous.

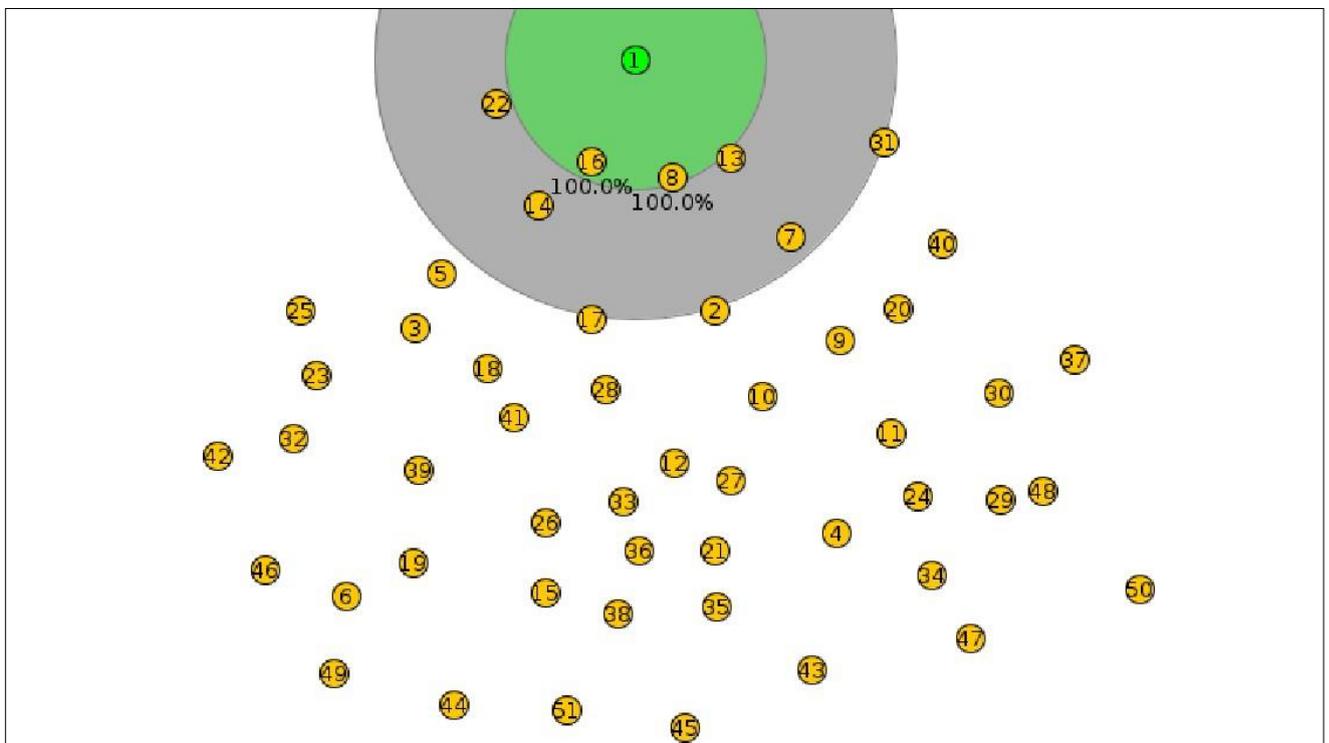


Figure 5. 2 Topologie aléatoire de 50 nœuds.

La figure 5.2 montre la configuration du réseau RPL avec 50 nœuds qui envoient (clients) et 1 nœud racine (serveur) dans le simulateur Cooja, Le nœud vert marqué comme 1 est la racine, tous les autres nœuds avec les cercles orange sont les nœuds sender et qui envoient des paquets au nœud racine. Le plus grand cercle vert indique la zone de transmission et le cercle gris montre la zone de collision radio. Les chiffres en pourcentage indiquent le taux de réception.

Dans un premier temps nous avons calculé la consommation moyenne d'énergie pour un ensemble de nœuds {20 ; 40 ; 50} et pour le réseau total pour SMART-RPL et nous l'avons comparé à la fonction objective OF0 du standard RPL,

D'après la figure 5.3, les résultats indiquent que SMART-RPL obtient de meilleurs résultats pour le réseau par rapport à OF0 (RPL Standard)

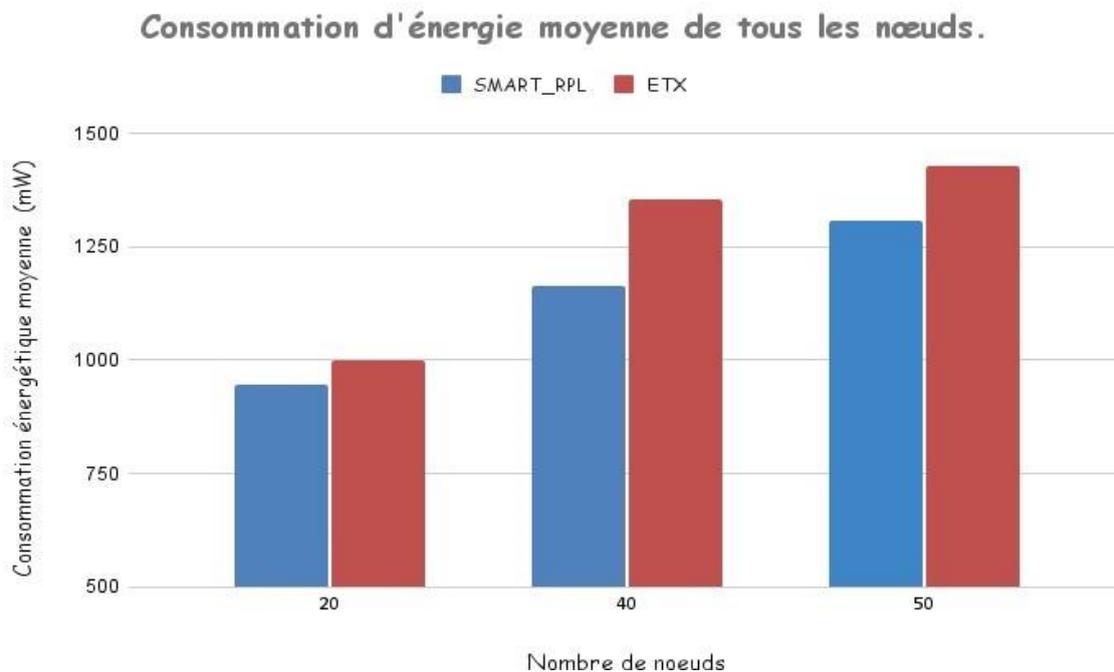


Figure 5. 3 La consommation énergétique moyenne de tous les nœuds.

Comparé à RPL standard (utilisant l'ETX comme métrique de routage), la consommation d'énergie des nœuds dans SMART-RPL est similaire et faible, comme le montre la figure 5.3. Le tableau 5.2 montre que la consommation d'énergie moyenne des nœuds dans SMART-RPL est inférieure à celle de RPL. La durée de vie des nœuds dans SMART-RPL est apparemment plus longue que celle de RPL. Tous les résultats montrent que la métrique de routage SMART_RPL permet de réduire la consommation d'énergie moyenne et d'équilibrer la consommation de l'ensemble du réseau de manière efficace.

Tableau 5. 2 La consommation d'énergie moyenne des nœuds.

Protocole	20 Nœuds	40 Nœuds	50 Nœuds
RPL	999.6	1353.675	1426.8
SMART_RPL	945.15	1162.725	1307.52
pourcentage d'amélioration	5,44%	14,1%	8.35%

Nous avons également calculé le taux de réception des paquets dans le réseau pour SMART_RPL et l'avons comparé à la fonction objective OF0 du standard RPL, comme le montre la figure 5.4. Nous avons remarqué que SMART_RPL a un taux de livraison meilleur

que OF0 dans la majorité des cas, et cela montre l'importance de notre nouvelle fonction objective, qui donne un résultat mieux comparé à OF0.

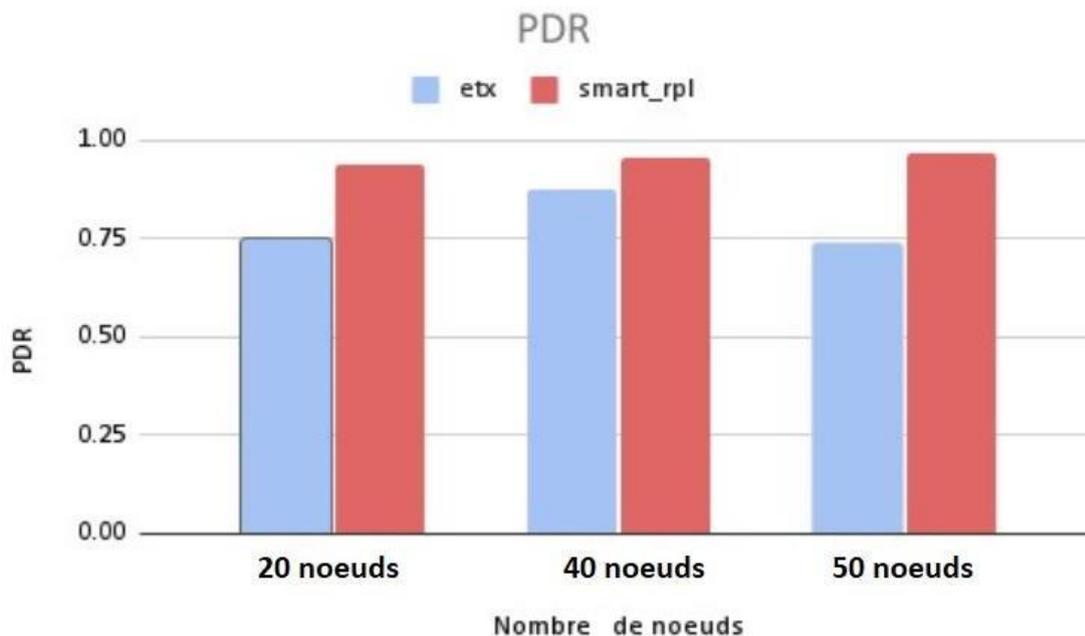


Figure 5. 4 Diagramme à colonnes PDR

Cette amélioration peut être attribuée à la manière dont SMART_RPL prend en compte certains facteurs spécifiques lors du choix des routes de transmission. En optimisant la sélection des nœuds en minimisant les pertes, SMART_RPL parvient à améliorer la livraison des paquets dans le réseau. La gestion efficace de l'énergie peut permettre aux nœuds de rester actifs plus longtemps, ce qui améliore le taux de livraison des paquets.

Ces résultats démontrent l'efficacité de l'approche adoptée par SMART_RPL et mettent en évidence l'importance d'utiliser des fonctions objectives adaptées aux besoins spécifiques des réseaux.

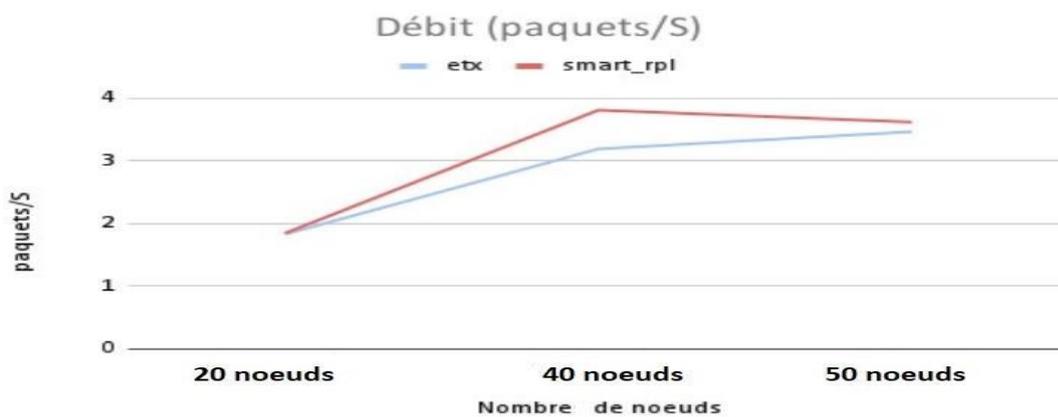


Figure 5. 5 : Débit SMART_RPL vs. ETX

En analysant le graphe de la Figure 5.5, il est clair que le débit de SMART_RPL est constamment supérieur à celui d'ETX. Cette différence significative peut être attribuée à deux facteurs principaux. Premièrement, SMART_RPL possède une capacité de découverte de chemin plus rapide, ce qui permet une transmission plus précoce des données par rapport à ETX. Deuxièmement, les valeurs de taux de réception des paquets (PDR) de SMART_RPL sont supérieures à celles d'ETX. Ces résultats soulignent l'efficacité de SMART_RPL en termes de débit, mettant en évidence sa capacité à optimiser les performances de transmission des données par rapport à ETX. Une gestion efficace de l'énergie peut prolonger la durée de vie des nœuds et maintenir des performances optimales. En réduisant la consommation d'énergie des nœuds, plus de ressources peuvent être consacrées au traitement et à la transmission des données, ce qui augmente le débit.

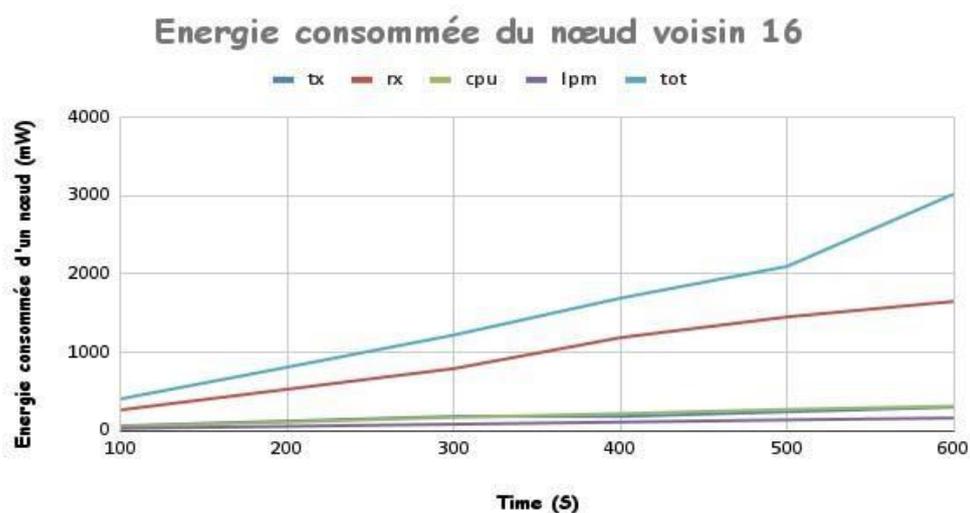


Figure 5. 6 : Energie consommée du nœud voisin 16 avec la nouvelle fonction objective (SMART_RPL)

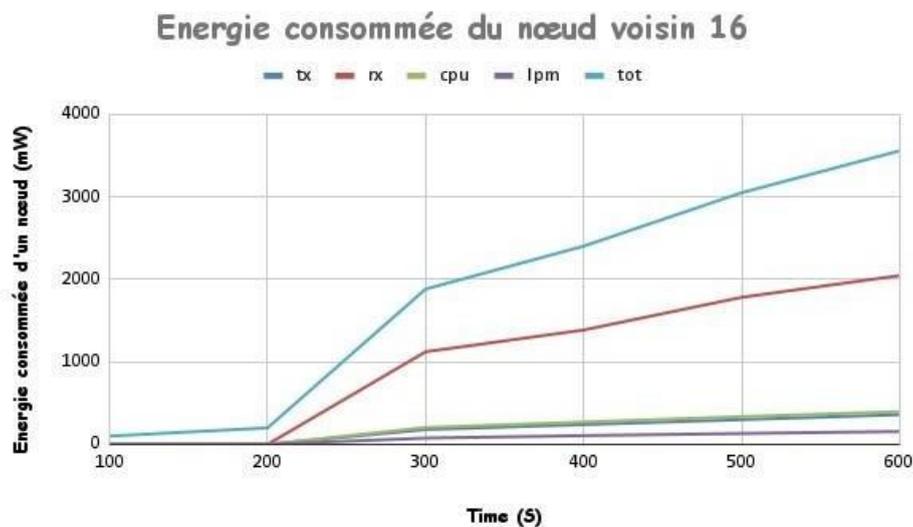


Figure 5. 7 : Energie consommée du nœud voisin 16 avec Rpl standard

Dans les figures 5.6 et 5.7 précédentes, le nœud voisin 16 a été sélectionné pour comparer la consommation d'énergie en fonction du temps, il est observé que la nouvelle fonction objective SMART_RPL présente une augmentation régulière.

En revanche, dans le cas de RPL standard, il y a une augmentation soudaine de la consommation d'énergie du nœud 16 à un certain moment (300 s). Cette dernière indique que RPL standard peut ne pas optimiser efficacement la consommation d'énergie du réseau, ce qui conduit à une augmentation brusque de la consommation d'énergie du nœud 16.

Cela peut être interprété de la manière suivante :

Pour SMART_RPL : La métrique utilisée pour sélectionner les routes et les parents pour le nœud 16 est conçue pour minimiser la consommation d'énergie globale du réseau tout en prenant en compte la consommation d'énergie du nœud 16 lui-même. Cela signifie que SMART_RPL réussit à maintenir une augmentation régulière de la consommation d'énergie du nœud 16, ce qui indique une utilisation plus efficace de l'énergie tout en maintenant une performance globale du réseau acceptable.

Pour RPL standard : La métrique utilisée pour la sélection des routes et des parents pour le nœud 16 peut ne pas être optimisée pour minimiser la consommation d'énergie globale du réseau tout en prenant en compte la consommation d'énergie des nœuds individuels. Cela conduit à une augmentation soudaine de la consommation d'énergie du nœud 16 à un certain point, indiquant une utilisation moins efficace de l'énergie et peut-être une surconsommation.

Ces observations mettent en évidence les avantages de l'utilisation de SMART_RPL, qui semble mieux optimiser la consommation d'énergie globale du réseau tout en prenant en compte la consommation d'énergie individuelle des nœuds, ce qui peut conduire à une meilleure performance énergétique globale du réseau.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exposé le fonctionnement de la fonction objective SMART_RPL et les résultats obtenus à l'aide du simulateur COOJA. SMART_RPL représente une avancée significative dans l'évaluation de l'efficacité énergétique du protocole RPL dans le contexte de la Smart Grid. Les résultats ont clairement démontré que SMART_RPL permet une utilisation plus efficace de l'énergie en prenant en compte divers aspects tels que la consommation énergétique. Cette approche plus complète offre de nouvelles perspectives pour améliorer les performances et l'efficacité des réseaux dans le domaine de la Smart Grid.

Conclusion générale et perspectives

En conclusion, l'introduction de contraintes de routage dans le protocole RPL, spécifiquement dans le contexte des Smart Grids, représente une avancée majeure pour la gestion efficace et optimisée des réseaux électriques intelligents. En particulier, l'ajout d'une nouvelle métrique d'énergie totale permet de prendre en compte les contraintes énergétiques spécifiques liées à la consommation et à la distribution de l'énergie.

Grâce à cette nouvelle métrique, les concepteurs et les gestionnaires de réseau ont désormais la possibilité de créer des stratégies de routage basées sur des considérations énergétiques précises. Cela signifie que les décisions de routage peuvent être prises en fonction de la consommation énergétique des nœuds du réseau, de la disponibilité des ressources énergétiques, de l'équilibre de charge et de la gestion des pics de demande.

En intégrant ces contraintes de routage énergétique dans le protocole RPL, les performances globales du réseau peuvent être considérablement améliorées. Les avantages incluent une réduction de la consommation énergétique globale, une optimisation de l'utilisation des ressources, une prolongation de la durée de vie des batteries des nœuds, une meilleure stabilité du réseau et une meilleure qualité de service pour les utilisateurs finaux.

L'ajout de contraintes de routage énergétique, avec une métrique d'énergie totale, dans le protocole RPL représente une avancée significative dans le domaine des Smart Grids. Il permet une gestion plus efficace et durable de l'énergie, une meilleure optimisation des ressources et une amélioration globale de la performance du réseau. Grâce à cette approche, nous pouvons progresser vers une infrastructure énergétique intelligente et résiliente, capable de répondre aux défis actuels et futurs de l'énergie.

Dans le contexte des Smart Grids (réseaux électriques intelligents), RPL peut être amélioré en ajoutant des perspectives spécifiques pour répondre aux besoins et aux défis particuliers de cette dernière, comme par exemple la sécurité, en raison de la nature critique des données et des infrastructures impliquées. RPL peut être renforcé avec des mécanismes de sécurité appropriés, tels que le chiffrement, l'authentification et la détection d'intrusion, pour protéger les communications et les données sensibles.

La prise en charge de la localisation et de la mobilité : Dans les Smart Grids, il peut être important de connaître la localisation des dispositifs ou de prendre en compte leur mobilité. RPL peut être enrichi avec des mécanismes de localisation et des techniques de gestion de la mobilité pour faciliter le routage efficace des données dans des environnements en constante évolution.

Optimisation des ressources réseau les Smart Grids ont des ressources réseau limitées en termes de bande passante, de capacité de stockage et de puissance de calcul. RPL peut être étendu pour inclure des mécanismes d'optimisation des ressources, tels que la compression des données, la déduplication ou l'agrégation, afin de réduire la charge sur le réseau et d'améliorer l'efficacité globale. D'autres améliorations peuvent être envisagées

Bibliographie

- [1] Han, M., & Zhang, H. (2013). Business intelligence architecture based on internet of things. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 50(1), 90-95.
- [2] Benghozi , P.-J., Bureau, S., Massit-Folléa, F., Waroquiers, C., & Davidson, S. (2009). L'internet des objets: quels enjeux pour l'Europe. Éd. de la Maison des sciences de l'homme
- [3] Viel, F., Augusto Silva, L., Leithardt, V. R. Q., De Paz Santana, J. F., Celeste Ghizoni Teive, R., & Albenes Zeferino, C. (2020). An Efficient Interface for the Integration of IoT Devices with Smart Grids. *Sensors*, 20(10), 2849
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- [5] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15).
- [6] Saleh, I. (2017). Les enjeux et les défis de l'Internet des Objets (IdO). *Internet des objets*, 1(1), 5.
- [7] Huang, Y., & Li, G. (2010). A Semantic Analysis for Internet of Things. In *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*.
- [8] Caulier, S., & Généau, D. (2016, 28 août). Les réseaux pour objets connectés: la nouvelle guerre de l'Internet. *Le Monde économie*
- [9] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- [10] Lee, J.-S., Su, Y.-W., & Shen, C.-C. (2007). A Comparative Study of Wireless Protocols: A Survey and a Comparison (pp. 46-51).

- [11] Huang, J., Qian, F., Mao, Z. M., Sen, S., & Spatscheck, O. (2012). Screen-off traffic characterization and optimization in 3G/4G networks. In Proceedings of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference (IMC) (pp. 357-363).
- [12] Yen, L. H., & Tsai, W. T. (2010). The room shortage problem of tree-based ZigBee/IEEE 802.15. 4 wireless networks. *Computer Communications*, 33(4), 454-462.
- [13] Lin, M.-S., Jenq-Shiou, L., Kuen-Han, L., & Jean-Lien C, W. (2013). Zigbee-based Internet of Things in 3D Terrains. *Computers & Electrical Engineering*, 39(16), 1667-1683.
- [14] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422
- [15] Kim, K. (2007). 6LoWPAN ad hoc on-demand distance vector routing (LOAD) (draft-daniel6lowpan-load-adhoc-routing-02.txt).
- [16] Guerin, J., Portmann, M., & Pirzada, A. (2007). Routing metrics for multi-radio wireless mesh networks. In 2007 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC 2007) (pp. 343-348)..
- [17] Hossain, M. R., Oo, A. M., & Ali, A. S. (2013). Smart grid. In *Smart Grids: Opportunities, Developments, and Trends* (pp. 23-44).
- [18] El Makhtoum, H., & Bentaleb, Y. (2021, March). Réseaux Electriques Intelligents (Smart Grids). In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021*
- [19] Hassan, R., & Radman, G. (2010, March). Survey on smart grid. In *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)* (pp. 210-213). IEEE.
- [20] Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Clausen, T., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., & Vasseur, J. (2011, March). RPL: IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. In Internet Engineering Task Force, Internet draft-IETF-roll-RPL-19.
- [21] Iwao, T., Yamada, K., Yura, M., Nakaya, Y., Cardenas, A., Lee, S., & Masuoka, R. (2010, October). Dynamic data forwarding in wireless mesh networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid Communications (pp. 385-390).

- [22] Maurya, P. K., Sharma, G., Sahu, V., Roberts, A., Srivastava, M., & Scholar, M. T. (2012). An overview of AODV routing protocol. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2(3), 728-732.
- [23] Sobral, J. V., Rodrigues, J. J., Rabêlo, R. A., Saleem, K., & Furtado, V. (2019). LOADng-IoT: An enhanced routing protocol for internet of things applications over low power networks. *Sensors*, 19(1), 150
- [24] Iyer, G., Agrawal, P., Monnerie, E., & Cardozo, R. (2011, October). Performance analysis of wireless mesh routing protocols for smart utility networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Grid Communications* (pp. 114-119).
- [25] Kulkarni, P., Gormus, S., Zhong, F., & Ramos, F. (2012). AMI mesh networks—A practical solution and its performance evaluation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1469-1481.
- [26] Mohamed, B., & Mohamed, F. (2015). QoS routing RPL for low power and lossy networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(11), 971545.
- [27] Wang, D., Tao, Z., Zhang, J., & Abouzeid, A. (2010, May). RPL based routing for advanced metering infrastructure in smart grid. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6).
- [28] Abid, M. A., Afaqui, N., Khan, M. A., Akhtar, M. W., Malik, A. W., Munir, A., ... & Shabir, B. (2022). Evolution towards smart and software-defined internet of things. *AI*, 3(1), 100-
- [29] Gao, L., Zheng, Z., & Huo, M. (2018, October). Improvement of RPL protocol algorithm for smart grid. In *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)* (pp. 927-930). IEEE.