الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole National Supérieure de Technologie

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunication et Réseaux

Thème : L'évaluation des performances du protocole RPL avec le support de la mobilité dans l'IoT : optimiser la QoS dans l'IoV

Réalisé par

BOUNEDER Nour et MALAOUI Wafa

Composition du Jury :

Président	Mr. CHERIFI Tarek,	Grade M.C.B	Université ENST
Promoteur	Mme. BENDOUDA Djamila,	Grade M.C.B	Université ENST
Examinateur	Mme ABBAD Leila,	Grade M.A.A	Université ENST
Examinateur	Mme CHIALI Imane,	Grade M.C.B	Université ENST

Année universitaire 2021 –2022

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrante : Mme BENDOUDA Djamila, de ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nos reconnaissances et gratitudes au chef département et à l'ensemble du corps enseignant de l'école pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme d'Ingéniorat. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui participer et encourager de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie avec respect ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A ma très chère mère,

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotes a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon cher père,

Tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes petits chers frères Rached et Makine que je vous souhaite tout le bonheur du monde et la réussite dans vos études.

A mes cousines Manel et khouloud que je vous souhaite une belle vie pleine de joie, de bonheur et de réussite. Egalement, à ma tante Radia, beaucoup de bonheur.

Je remercie toute personne qui m'a aidé, dirigé et soutenu dans cette difficile période plus particulièrement Hajar, Yacine et mes deux meilleures copines Fedwa et Sarra. Je vous souhaite beaucoup de joie, de bonheur et de réussite dans vos vies.

Merci pour leurs amours, leurs encouragements et pour tous ces moments qu'on avait vécus ensemble.

BOUNEDER Nour.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À ma très chère mère

À mon très cher père

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie.

A mes chers frères Sadji et Rabah, à mes chères sœurs Soria, Sadjia et Lydia

Puisse nos fraternels liens se pérenniser et se consolider encore. Avec mes souhaits de bonheur et de réussite dans votre vie. J'implore Dieu qu'il vous apporte bonheur, joie, chaleur et vous aide à réaliser vos vœux les plus chers.

Sans oublier ma petite nièce Maylisse et mon petit ange Amayas, je vous aime très fort

À tous les membres de ma famille, petits et grands, mes grands-parents, mes oncles et ma tante, Que Dieu vous bénisse et vous accorde santé, longue vie et beaucoup de bonheur.

A toute personne qui m'a soutenu dans cette période de mon projet plus particulièrement Younes, Zahra et Celia, je vous souhaite beaucoup de joie, de bonheur et de réussite dans vos vies, sans oublier mon binôme Nour pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

MALAOUI Wafa

Table des matières

Liste des figures ix

Liste des tableaux x

Introduction générale 1

1 Les réseaux de capteurs sans fils 4
- 1.1 Introduction . . . 4
- 1.2 Présentation d'un capteur . . . 4
  - 1.2.1 L'architecture : . . . 5
  - 1.2.2 Les composants d'un capteur : . . . 5
- 1.3 Les caractéristiques d'un réseau de capteur sans fil . . . 6
- 1.4 Les domaines d'application des réseaux de capteurs : . . . 8
- 1.5 Conclusion . . . 11

2 L'internet des véhicules IoV 13
- 2.1 Introduction . . . 13
- 2.2 Internet des objets et Internet des objets mobiles . . . 13
- 2.3 Définitions de l'IoV . . . 14
- 2.4 Composants de l'IoV . . . 14
- 2.5 Architecture IoV . . . 15
- 2.6 Types de communications . . . 16
- 2.7 Applications d'IoV . . . 17
- 2.8 Protocole de routage dans IoT . . . 18
- 2.9 Conclusion . . . 18

3 Description du protocole RPL 20
- 3.1 Introduction . . . 20
- 3.2 Le principe de protocole RPL . . . 20
- 3.3 Construction de la topologie . . . 21
  - 3.3.1 Formation des routes montantes . . . 21
  - 3.3.2 Formation des routes descendantes . . . 22
- 3.4 Maintenance de la topologie . . . 24
  - 3.4.1 Réparation globale . . . 24
  - 3.4.2 Réparation locale . . . 24
- 3.5 Métrique de routage . . . 25
  - 3.5.1 Message de contrôle (Overhead) : . . . 25
  - 3.5.2 Taux de perte de paquets(PLR) : . . . 25

3.5.3 Energie de nœuds : . . . 25
3.6 Fonction objective . . . 26
3.6.1 Fonction objective zéro . . . 26
3.6.2 Le rang minimum avec fonction objective d'hystérésis . . . 26
3.7 Classification . . . 26
3.8 Construction de DODAG . . . 27
3.9 Qualité de service avec protocole RPL . . . 28
3.9.1 Etat de l'art : . . . 28
3.9.2 Critiques et solution : . . . 29
3.10 Conclusion . . . 30

4 Evaluation et amélioration des performances du protocole RPL dans l'IoV 32

4.1 Introduction . . . 32
4.2 Outils de simulation . . . 32
4.2.1 Présentation de CONTIKI : . . . 32
4.2.2 Simulateur COOJA : . . . 33
4.3 Environnement de simulation . . . 34
4.3.1 Lancer Cooja : . . . 35
4.3.2 Démarrer une simulation : . . . 35
4.3.3 Créer des nœuds : . . . 35
4.4 Indicateurs de performances . . . 36
4.5 Evaluation selon différentes métriques de routage . . . 36
4.6 Amélioration proposée sur le protocole RPL : . . . 37
4.7 Premiére partie : l'évaluation en mode statique . . . 38
4.8 Deuxième partie : l'évaluation en mode dynamique . . . 42
4.9 Troisième partie : comparisons et discussions . . . 47
4.10 Conclusion . . . 49

Conclusion Générale et perspectives 50

Bibliographie 51

Abréviations

AODV :Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing.
AOMDV :Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing.
API : Application Programming Interface
Cooja : Contiki os java simulator.
DODAG :Destination Oriented Directed Acyclic Graph.
DIO :DODAG Information Object .
DIS :DODAG Information Solicitation.
DAO : DODAG Destination Advertisement Object .
DAO-ACK : DAO Acknowledgement.
ER : Résiduel énergie .
ETC : Electronic Toll collection.
ETX : Expected Transmission Count.
FE :Energie future.
FMOF : Fuzzy Mobility Objective Function.
IETF :Internet Engineering Task Force.
IoT :Internet of Things.
IoV : Internet of vehicule .
IP :Internet Protocol .
IETF : Internet Engineering Task Force.
GSM : Global System For Mobile.
GPS : Global Positioning System.
http : Hyper Text Transfer Protocol.
LLN :Low power and Lossy Networks.
LOAD :6LoWPAN AdHoc Routage de vecteur de distance à la demande . LQL :Link Quality Level.
MRHOF : Minimum Rank with Hysteresis Objective Function.
NGTP :Next Generation Telematics Protocol.
OBU : On Board Unit.
OF : Objective Function
OF0 : Objective Function Zero.
PTMP :Public Traffic Management System.
QoS : quality of service.
RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil.
RERR :Route Error.
RFID :Radio Frequency Identification.
RoLL : Routing over Low power and Lossy networks.
RPL : Routing Protocol for Low power and lossy networks.
SDN :Software-Defined Networking.
SMTP : Simple Mail Transfer Protocol.
TCP :Transmission Control Protocol.
UDP : User Datagram Protocol.
VANet :Vehicular Ad-Hoc Network VRU :Protection des usagers vulnérables de la route .
WAP : Wireless Application Protocol.
WiMax : Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN :Wireless Local Area Network.

WSN : Wireless Sensor Network.
6LoWPAN :IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks.

Résumé

L'Internet des véhicules est l'un des domaines les plus prometteurs pour le développement d'applications nouvelles et intelligentes. Pour certaines applications, une exigence de qualité de service peut être imposée. Cependant, les objets connectés dans ce type de réseaux sont souvent vulnérables et dotés d'une énergie limitée (Low-power and Lossy Networks LLNs).Ces réseaux ont besoin de solutions spéciales pour le routage et RPL est le protocole de routage IPv6 pour les réseaux à faible puissance et avec perte (LLN) ,a été proposé par le groupe de travail IETF(Internet Engineering Task Force) ROLL (Routing Over Low-power Lossy links).Le RPL répond largement aux exigences des réseaux de capteurs à faible consommation et à forte perte, mais certains points sont ouverts à l'amélioration et à la spécification, notamment en ce qui concerne l'assurance de la qualité de service (QoS) et la prise en charge de la mobilité.

Mots clés : L'Internet des véhicules, RPL, QOS, LLN.

ABSTRACT

The Internet of Vehicles is one of the most promising areas for the development of new and intelligent applications. For some applications, a quality of service requirement may be imposed. However, the objects connected in this type of network are often vulnerable and endowed with limited energy (Low-power and Lossy Networks, LLNs). These networks need special solutions for routing and RPL is the IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks (RPL) proposed by the IETF ROLL working group (Routing Over Low-power Lossy links) .The RPL largely meets the requirements of low-power, high-loss sensor networks, but some points are open for improvement and specification, especially with regard to Quality of Service (QoS) assurance and mobility support.

keywords :The Internet of Vehicles, RPL , QOS ,LLN.

ملخص

يعد إنترنت المركبات أحد المجالات الواعدة لتطوير تطبيقات جديدة وذكية. بالنسبة لبعض التطبيقات، قد يتم فرض متطلبات جودة الخدمة. ومع ذلك، غالبًا ما تكون الكائنات المتصلة في هذا النوع من الشبكات منخفضة الطاقة وفقدان الطاقة). تحتاج هذه LLNعرضة للخطر ويتم منحها طاقة محدودة (شبكات للشبكات منخفضة الطاقة وفقدان IPv6 هو بروتوكول توجيه RPLالشبكات إلى حلول خاصة للتوجيه و (التوجيه ROLL (فرقة عمل هندسة الإنترنت) IETF) ، تم اقتراحه من قبل مجموعة العمل (LLN) إلى حد كبير متطلبات شبكات الاستشعار منخفضة RPLعبر روابط فقدان الطاقة المنخفضة). يلبي الطاقة والخسارة العالية، ولكن بعض المجالات مفتوحة للتحسين والمواصفات، لا سيما فيما يتعلق بضمان جودة الخدمة (QoS) ودعم التنقل.

الكلمات الرئيسية : **إنترنت المركبات, RPL ,QOS, LLN**

Table des figures

1.1 Schématisation de la chaine de collecte de données [19] 5
1.2 Architecture d'un réseau de capteur[19]. 5
1.3 Composants de nœud capteur[4]. 6
1.4 Application médicale. 9
1.5 Application domotique. 10

2.1 L'internet des objets IoT 14
2.2 L'internet des véhicules IoV [3]. 15
2.3 Architecture de l'internet des véhicules[8]. 16
2.4 Les cinq types de communication[8]. 17

3.1 Graphe DAG et DODAG[15] 21
3.2 Format de message DIO[20] 22
3.3 Format de message DAO[20]. 23
3.4 Format de message DAO-ACK[20]. 24
3.5 Diagramme de classifaction[20]. 27
3.6 Construction de DODAG[18]. 28

4.1 Architecture de Contiki [7] 33
4.2 Interface graphique de Cooja. 34
4.3 création d'une nouvelle simulation. 35
4.4 Modification dans le fichier mrhof.c 38
4.5 L'énergie consommée par le réseau. 39
4.6 Taux de réussite de paquets dans le réseau. 40
4.7 Taux de perte de paquets dans le réseau. 41
4.8 Edit settings. 43
4.9 l'énergie consommée avec la mobilité de réseau. 44
4.10 Taux de livraison de paquets dans le réseau avec le support de mobilité. . . . 45
4.11 Taux de perte de paquets avec le support de mobilité. 46
4.12 Evaluation de l'énergie moyenne consommée par le réseau. 47
4.13 Evaluation de taux de livraison de paquets dans le réseau. 48
4.14 Evaluation de taux de perte des paquets dans le réseau. 49

Liste des tableaux

4.1 Paramètres de simulation 35

Introduction générale

Le paradigme de l'Internet des objets (IoT) est en train de passer rapidement du rêve à la réalité. Il est devenu un avenir potentiel et un impact technologique sur la vie humaine, comme les soins de santé, la logistique, la maison intelligent , les transports et les réseaux sans fil de capteurs, etc. Grace aux progrès des télécommunications et des technologies, les véhicules peuvent désormais disposer d'un accès à l'internet créant ainsi des réseaux véhiculaires, donc l'internet des véhicules est devenu l'évolution des réseaux des véhicules (VANet).

Les véhicules connectés « objets connectés » sont généralement équipés de capteurs (capteurs de température, vibration, lumière, etc.) et d'actionneurs pour surveiller ou interagir avec l'environnement, et il existe de nombreux algorithmes et protocoles de routage qui ont été acquis via des réseaux de capteurs sans fil pour faire face à de nombreux défis, tels que la consommation d'énergie et la perte de paquets dans n'importe quel algorithme de routage.

Les chercheurs ont fait de nombreuses études pour relever ces défis en utilisant le protocole de routage IPv6 pour faible consommation et avec perte Network (RPL).

Le protocole RPL est un protocole de routage pour les réseaux à faible puissance et avec perte. Il est devenu le protocole de routage standard pour l'Internet des objets (IoT) et l'Internet des objets mobiles (IoV). Depuis sa standardisation dans la RFC6550 en 2012, le volume de recherches liées à la RPL a augmenté de façon exponentielle et de nombreuses améliorations et études ont été introduites pour évaluer et améliorer ce protocole.

Avec une forte demande d'internet et l'émergence de services et d'applications multimédia. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour fournir un meilleur service à l'utilisateur et mesurer la qualité de service : délai de transmission, débit, perte de paquets, gigue et disponibilité.

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer les performances du protocole RPL, afin de proposer une amélioration du protocole RPL, qui se résume dans la création d'une 3ème version de la fonction objective dans le but de prendre en considération la qualité de service qui nous aidera à d'optimiser la consommation énergétique ainsi que le taux de livraison de paquets dans le réseau,cela permet d'augmenter la durée de vie de réseau .

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en quatre (04) chapitres selon le plan méthodologique suivant :

- Le premier chapitre consacré à la présentation des réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application.
- Le deuxième chapitre fait l'objet de la présentation de l'IoV (Internet of vehicule) à savoir son architecture, ses composants, ses types de communications et aussi les protocoles de routage dans l'IoT.
- Le troisième chapitre est une présentation détaillée du protocole de routage RPL qui fait l'objet de notre étude avec la notion de QoS.
- Le quatrième chapitre est réservé pour évaluation et amélioration des performances

du protocole RPL dans IoV.

— En fin, une conclusion sur les travaux effectués dans les différents chapitres sus indiqués.

Chapitre 1 :
Les réseaux de capteurs sans fils

Chapitre 1

Les réseaux de capteurs sans fils

1.1 Introduction

La technologie des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)[1] ne cesse de s'accroitre dans différents domaines de la vie courante, à savoir le domaine militaire, agricole, le domaine de santé, le secteur industriel, et plein d'autres. Cela est justifié par la contribution adéquate et efficace de tels réseaux à la modernisation des méthodes et techniques de surveillances et de contrôle à distance des phénomènes dans des environnements de différentes natures.

Les RCSFs se composent généralement de plusieurs nœuds capteurs minuscules, stationnaires ou mobiles, souvent sont déployés aléatoirement dans un champ de captage. Ce dernier est généralement représente un milieu hostile, isolé ou difficile à contrôler, où la fonction d'un nœud capteur consiste à chaque fois, de récolter, d'une façon autonome, des informations précises avec une probabilité d'erreurs minimale depuis l'environnement de déploiement. Cela à savoir le type du nœud capteur, la donnée captée peut être la température, la pression, l'humidité, la lumière ou autres. Les nœuds capteurs dans un RCSF communiquent entre eux via des liens radio afin d'acheminer les données collectées à partir de plusieurs nœuds vers un nœud considéré comme" point de collecte", appelé une station de base ou un puit. Cette dernière peut être liée et connectée à une machine puissante, appelée gestionnaire des tâches, via Internet ou par satellite. En outre, le réseau peut être configuré de telle sorte que l'utilisateur puisse envoyer ses requêtes aux capteurs en précisant l'information requise, ainsi en ciblant les nœuds capteurs qui devraient s'y intéresser.

En raison de leur faible coût, leur taille réduite et leur efficacité, les capteurs ont réussi à gagné l'appréciation des utilisateurs et sont de plus en plus omniprésents. Ainsi, leurs contraintes en termes d'énergie, de calcul et de communication ont fait l'objet de nombreux projets de recherche qui se sont intéressés et rendu la conception des protocoles de routage un grand défi. Dans le présent chapitre nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'application et leurs architectures.

1.2 Présentation d'un capteur

Un capteur est un dispositif consistant à transformer une grandeur physique en une grandeur quantifiable, généralement électronique, qui peut être présentée en une donnée binaire exploitable, compréhensible et traitée par un système d'information. On trouve plusieurs types de capteurs tels que capteur de position, d'accélération, de luminosité, de mouvement,

de température, etc.

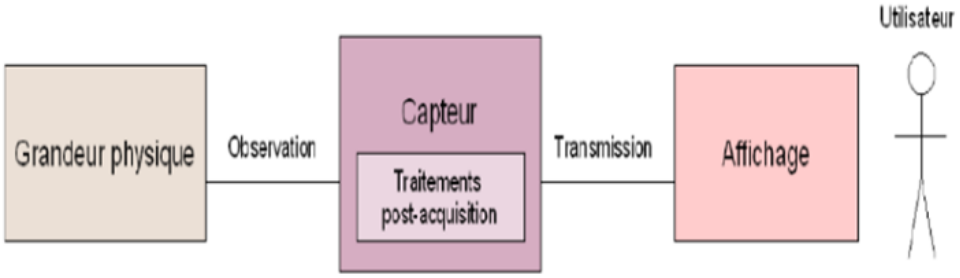


FIGURE 1.1 – Schématisation de la chaine de collecte de données [19]

1.2.1 L'architecture :

Il existe plusieurs types de capteurs selon le domaine d'application : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Autrement, un capteur est composé principalement d'une unité d'observation, de traitement et de communication. Des composants supplémentaires peuvent être rajoutés selon le besoin, à titre d'exemple un système de localisation de l'environnement tel qu'un GPS, d'un système de mobilité mais aussi parfois d'un générateur d'énergie (cellule solaire).



FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteur[19].

1.2.2 Les composants d'un capteur :

Un nœud capteur comporte quatre unités principales représentées par une unité d'acquisition, une unité de traitement, une unité de communication et une batterie. Qui sont représentées dans la figure

- **L'unité d'acquisition :** est généralement composée de deux sous-unités : un dispositif de capteur et des convertisseurs analogique-numérique ADCs, Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux locaux et les transforment en

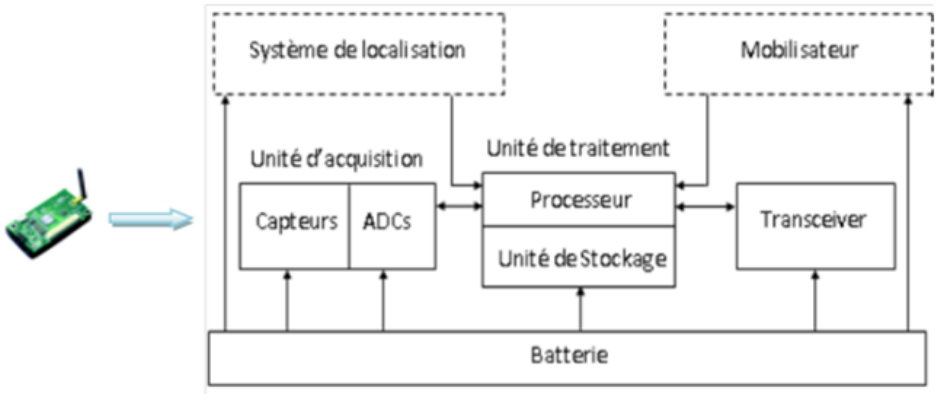


FIGURE 1.3 – Composants de nœud capteur[4].

signaux analogiques. Ces ADCs assurent le passage des signaux analogiques en des signaux numériques.

- **L'unité de traitement :** comme l'indique son nom, cette unité est responsable de traiter les données captées avant d'être. Elle comporte deux interfaces : une interface avec l'unité d'acquisition et l'autre avec le module de transmission. L'unité de traitement contrôle les procédures qui permettent au nœud capteur de réaliser les tâches d'acquisition et de stockage de données collectées dans une mémoire limitée.
- **L'unité de communication :** est composé d'un émetteur et récepteur, l'unité est responsable de toutes les communications entre les nœuds de réseau via un support de communication radio.
- **Batterie :** c'est le composant primordial d'un capteur, ce dernier doit avoir une source d'énergie pour alimenter les unités d'acquisition, de traitement et de communication.

1.3 Les caractéristiques d'un réseau de capteur sans fil

- **Déploiement dense :**lorsque le nombre de nœuds capteurs dans un RCSF très élevé, il peut même atteindre des milliers, voire des millions. Le défi dans tel cas, est que le réseau soit capable d'assurer et de maintenir ses performances avec ce grand nombre de nœuds capteurs.
- **Déploiement aléatoire :**la façon dont les nœuds sont déployés est souvent dispersés d'une manière aléatoire(à l'aide d'un avion à titre d'exemple), pour rendre la communication efficace, il nécessite l'adoption des protocoles et algorithmes d"auto-organisation.
- **Consommation énergétique :** La principale source de consommation d'énergie par un nœud est la radio. La puissance de transmission étant proportionnelle au carré de la distance entre la source à la destination, les transmissions d'un-saut ne sont pas toujours possibles : présence d'obstacle, éloignement des nœuds (déploiement aléatoire), ...etc. le nœud doit bien gérer son énergie pour assurer sa double fonction de source et relayeur d'informations, celle-ci dépend la durée de vie du réseau. En cas de défaillance de certains nœuds qui principalement due à l'épuisement de leurs batteries, le routage devrait s'adapter, en effectuant une maintenance et une réorganisation de la topologie suivie d'une construction

des autres chemins.[19]

• **Modèle de transmission de données :** le captage et l'envoi des données dans un réseau de capteurs sont non seulement dépendants de l'application cible, mais aussi de fonction du niveau de criticité de l'information. On distingue alors les modèles de données continus, événementiel. Dans le modèle continu, l'envoi des informations par les nœuds au point de collecte se fait de façon périodique. Ainsi ce modèle est approprié d'une grandeur physique pour les applications de surveillance continue, tel que le relevé de température ou de luminosité. Dans les modèles à base de requête ou événementiel, la transmission des informations est déclenchée par la racine ou lorsqu'un événement se produit affecte un changement soudain ou seuil de valeur dépassé dans les données captées. Cependant, ces modèles de transmissions conviennent pour les applications temps-critique, et une combinaison de tous ces modèles est également possible dans un déploiement de réseau. [19]

• **Hétérogénéité et capacité des nœuds :**dans la plupart des travaux de RCSF, les nœuds sont généralement supposés être homogènes : initialement, ils possèdent les mêmes capacités de mémoire et d'énergie, de puissance de calcul et de portée de transmission. Toutefois, il est nécessaire pour certaines applications d'associer des fonctions spécifiques tels que de capter, relayer et agréger les informations à certains nœuds.

• **Agrégation de données :** lorsque des nœuds envoient des données redondantes, les paquets générés peuvent être agrégées de sorte à réduire le nombre de transmissions nécessaires. L'agrégation est la fusion de données provenant de plusieurs sources en utilisant un opérateur d'agrégation. Il peut être la suppression des doublons, de la recherche du maximum, du minimum ou de la moyenne des valeurs collectées. Certaines de ces opérations peuvent être réalisées partiellement sur chaque nœud de réseau. Ainsi, ces opérations ne soient pas aussi consommatrices d'énergie que les communications. L'agrégation réalise un gain significatif d'énergie. Dans certaines architectures de réseau, le nœud responsable de l'opération d'agrégation le nœud le plus puissant en processeur, mémoire et portée radio. [19]

• **Tolérance aux pannes :** Un certain nombre de nœuds peuvent avoir des problèmes de communication dus aux interférences, subir des défaillances matérielles, ou être hors d'usage du fait de l'épuisement de leur batterie. Cette défaillance de certains nœuds ne devrait pas compromettre toutes les opérations réseaux. Le routage doit s'adapter pour trouver de nouveaux liens et routes d'acheminement de données à la station de base. Ceci peut nécessiter par exemple, une recherche active d'alternative par une adaptation de la puissance de transmission. Par conséquent, une redirection des paquets sur les routes alternatives dont les nœuds disposent encore de suffisamment d'énergie se fera. Un certain niveau de redondance est permis pour qu'un RCSF soit ainsi tolérant aux pannes. [19]

• **Passage à l'échelle :**le nombre de nœuds déployés dans un RCSF est très important, peut être de l'ordre de plusieurs centaines ou milliers. Tout schéma de routage devrait s'accommoder avec ce réseau dense. Cependant, certains nœuds pourront être maintenus à l'état de sommeil jusqu'à ce qu'au déclenchement de leur réveil lors d'un événement particulier, et les nœuds restants assureront alors la fonction d'acquisition et de transport des informations dans le réseau. [19]

• **Dynamique réseau :** considèrant les entités constitutives d'une application de RCSF, les senders (nœud d'acquisition et de relais d'information), le sink et le phénomène observé, peuvent être soit mobile soit statique. Ainsi, une grande majorité d'architectures réseaux suppose que les senders et le sink sont toujours statiques. Toutefois le routage des informations en provenance ou à destination de nœuds en mouvement est un véritable défi.

La stabilité des routes devient alors un paramètre prépondérant, en plus des autres fac-

teurs l'énergie, la bande passante et la mémoire. A titre d'exemple d'un phénomène de mobilité une application de détection et de suivi d'une cible. Pour un phénomène statique, le réseau peut être réactif lorsqu'il remonte uniquement le trafic lors d'un événement produit. Un phénomène dynamique nécessite très souvent un envoi régulier d'informations et par conséquent d'avantage de données à acheminer. [19]

- **Qualité de Service :**pour de nombreuses applications les données doivent être délivrées à la destination dans un délai précis après leur acquisition par le capteur, autrement ces données deviendraient inexploitables et sans intérêt. Toutefois l'optimisation d'énergie, ayant un impact direct et majeur sur la durée de vie du réseau, est généralement considérée comme plus importante que la qualité des paquets à transférer. Dès que l'énergie diminue, pour des applications n'ayant pas de contraintes strictes par rapport aux délais, les nœuds peuvent être amenés à réduire la qualité des informations livrées de sorte à maximiser l'utilisation du réseau et d'augmenter sa durée de vie.[19]

1.4 Les domaines d'application des réseaux de capteurs :

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent se résider dans divers domaines d'application. Parmi ces domaines ,on peut citer la surveillance, le militaire, la santé, l'industriel, le médical, le climatique ,l'environnemental etc.

- **Applications militaires :** Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Déploiement sur un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (par la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations, par exemple). [21]
- **Applications liées à la sécurité :**Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourraient être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ou autres connexions filaires. Les capteurs doivent s'activer périodiquement et peuvent ainsi fonctionner durant des années, voire des décennies. Un réseau de capteurs de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur. Déconnecter le système ne serait plus aussi simple, puisqu'il n'existe pas de point critique. La surveillance de voies ferrées pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains peut être une application intéressante des réseaux de capteurs. La protection des barrages pourrait être accomplie en y introduisant des capteurs. La détection prompte de fuites d'eau permettrait d'éviter des dégâts. Les êtres humains sont conscients des risques et attaques qui les menacent. Du coup, ils mettent à disposition toutes les ressources humaines et financières nécessaires pour leur sécurité. Cependant, des failles sont toujours présentes dans les mécanismes de sécurisation appliqués aujourd'hui, sans oublier leur coût très élevé. L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats. [21]
- **Application à la surveillance :** L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de sécurité peut contribuer à la diminution des dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans les

grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments est utilisée à détecter les fissures et les altérations causés dans la structure par un séisme ou au vieillissement de la structure. Lors d'un déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement il est possible d'intégrer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance. [21]

- **Applications écologiques :**L'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenches qu'aux endroits o'u il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée 'a grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie.[21]
- **Applications de traçabilité et de localisation :** Suite à une avalanche, il est nécessaire de localiser les victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement les victimes. Contrairement aux solutions de traçabilitée, et de localisation basées sur le système de GPS (Global Positionning System), les réseaux de capteurs peuvent être trés utiles dans des endroits clos comme les mines par exemple[21].
- **Application médicale :** Applications médicales Surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité facilitant ainsi le diagnostic de maladies grâce à des micro-capteurs qui pourront être ingères ou implantes sous la peau.

(i) les micro-cameras qui peuvent être ingérées et sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain.

(ii) la création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour améliorer la vision de l'œil[21].

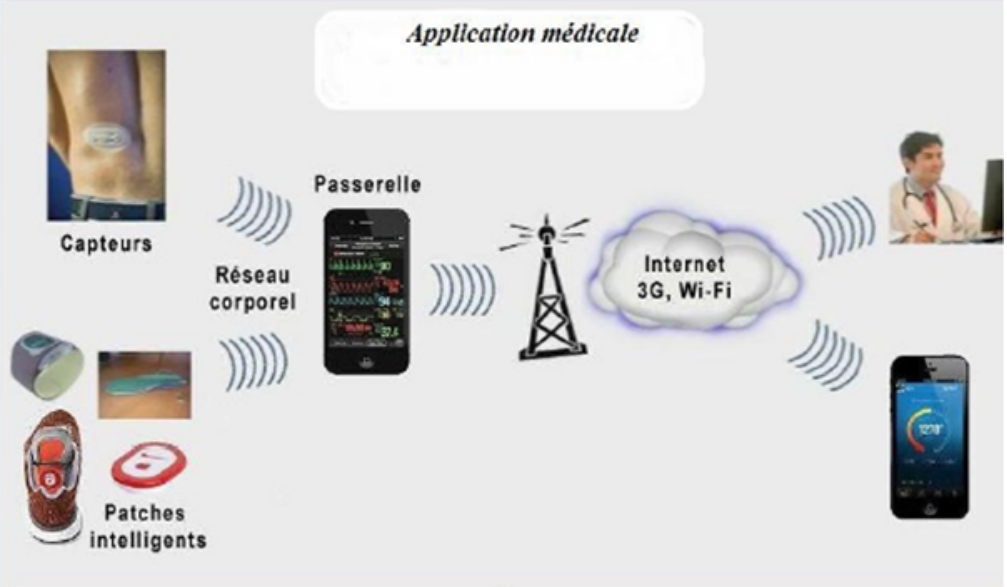


FIGURE 1.4 – Application médicale.

- **La domotique :**Les réseaux de capteurs peuvent être appliqués dans les futures maisons dites intelligentes, dans cette application, le réseau de capteurs est déployé dans l'habitation. Le principe est que le réseau forme un environnement, dit pervasif où l'objectif étant de fournir toutes les informations nécessaires aux applications d'automatisation pour le confort,

la sécurité et la maintenance dans la maison. Les capteurs sont incorporés dans différents dispositifs domestiques (tel que : chauffage, système d'éclairage, dispositif d'incendie, alarme de détection d'intrusion, volet roulant, etc.), afin de répondre aux besoins de l'utilisateur, en lui permettant un contrôle plus aisé sur ces dispositifs localement ou à distance, par internet ou par satellite. Ce qui garantira aux habitants plus de confort, de sécurité, ainsi une facilité de maintenance, et d'un autre coté c'est l'un des moyens utilisés pour pouvoir minimiser les dépenses énergétiques.[19]



FIGURE 1.5 – Application domotique.

- **Les applications industrielles :** La miniaturisation des capteurs sans fil permet denombreuses perspectives applicatives comme celles liées au contrôle et au suivi industriel. Endispersant les capteurs dans différents emplacements (à l'intérieur ou à l'extérieur, ou encoreau-dessus) d'une zone industrielle, ces derniers peuvent :

détecter et contrôler des fuites de produits chimiques, diagnostiquer les dispositifs de production, contrôler la qualité desproduits, contrôler des processus d'usinage, etc. Ces informations peuvent être très utiles emmènent à ajuster et améliorer certains paramètres (température, ingrédient,...), pour un bon fonctionnement et une meilleur qualité de production.[19]

- **Applications commerciales :** Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la position actuelle du paquet. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.[21]

1.5 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de la communication, cette nouvelle technologie suscite un intérêt considérable et croissant vu la diversité des ces applications : domotiques, surveillances, médicale commerciales et même dans le domaine industriel.

Dans le chapitre suivant, nous introduisant en détails l'internet des véhicules, son importance, son architecture et ses types de communication.

Chapitre 2 :
L'internet des véhicules IoV

Chapitre 2

L'internet des véhicules IoV

2.1 Introduction

L'Internet des Objets (IoT) est l'une des technologies en plein essor ces dernières années. Les industries de l'IoT, telles que les compteurs intelligents, les réseaux intelligents, les villes intelligentes et les soins de santé etc, devraient connaître une croissance radieuse au cours des 10 prochaines années.

Les technologies de communication sans fil jouent un rôle clé pour répondre à la demande de communication flexible et omniprésente des dispositifs IoT.

En particulier, avec le développement rapide des véhicules intelligents, Internet de véhicules (IoV) s'impose comme une solution prometteuse vision pour la sécurité routière, l'évitement des collisions et l'information services de transmission dans les systèmes de transport intelligents .

Avec l'aide d'IoV, les véhicules intelligents peuvent être interconnectés à Internet et échangés intelligemment des informations et des contenus entre véhicules intelligents avec une interaction humaine minimale.

2.2 Internet des objets et Internet des objets mobiles

L'internet des objets est une nouvelle technologie, qui se concentre sur l'intégration de certaines dispositifs informatiques embarqués dans l'infrastructure Internet. Il est créé afin de s'adapter aux exigences de la technologie de pointe, qui ont besoin de communication et d'information échanger via Internet.

L'objectif principal de son développement consiste à faire des tâches faciles pour les utilisateurs et les environnements intelligents, en utilisant la fonctionnalité de contrôle à distance de choses.

Ces technologie est d'abord appliquée dans les capteurs et les actionneurs. Ensuite, il est étendu à différents systèmes, à savoir les réseaux intelligents, les centrales électriques virtuelles, les maisons intelligentes, les transports intelligents et les villes intelligentes.

La conception de l'IoT consiste à collecter les données nécessaires et les diffuser de manière autonome entre différents appareils intelligents. Un nouveau paradigme, appelé l'Internet des objets mobiles, a été proposé afin d'améliorer certaines applications nécessitant la mobilité de leurs appareils.

Cette technologie a une conception et une stratégie comme l'IoT. Il permet simplement aux appareils d'être connectés tout en se déplaçant et assurant la même fonction que les appareils fixes.

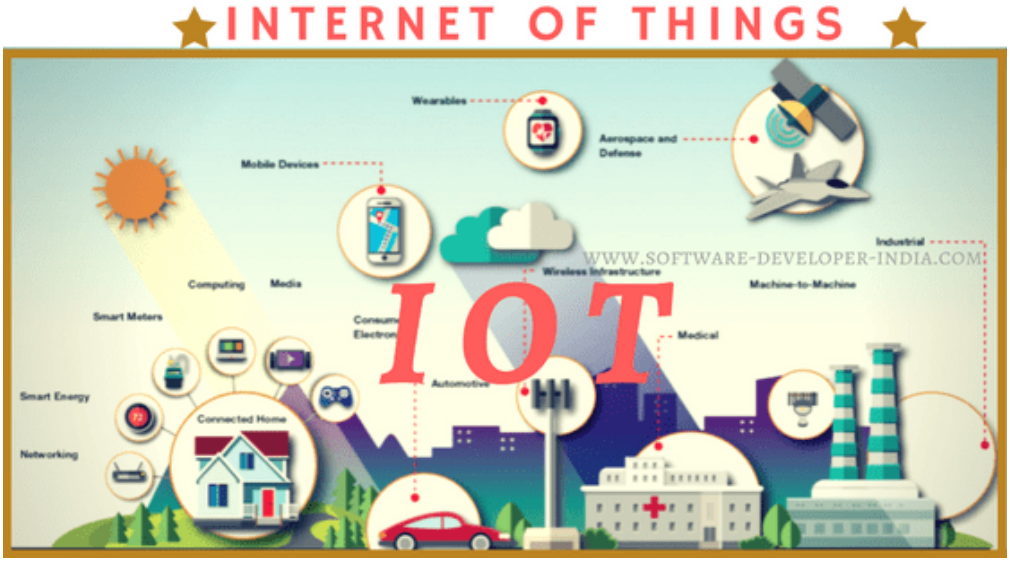


FIGURE 2.1 – L'internet des objets IoT [16].

2.3 Définitions de l'IoV

1. L'Internet des véhicules (IoV) est un réseau distribué, qui permet l'utilisation des données créées par le réseau de véhicules (VANet) et de véhicules connectés dont son objectif important est de permettre aux véhicules de communiquer en temps réel avec leurs conducteurs humains, les piétons, les autres véhicules, l'infrastructure routière et les systèmes de gestion du parc automobile . Le véhicule peut également communiquer avec tout autre objet connecté à internet, tel que : drones, objets connectés piétons (smartphones, montres connectées, etc.).[12]
2. L'Internet des véhicules (IoV) est un nouveau système cyber-physique, qui intègre les VANET, les réseaux IoT et le cloud computing mobile. Dans l'IoV, les véhicules sont considérés comme des objets connectés ou des nœuds, qui sont équipés avec Internet et les réseaux sans fil, permettant aux véhicules intelligents de collaborer les uns avec les autres pour le partage de données et communications. [14].

   Les véhicules intelligents interagissent également avec les unités routières et les autres usagers de la route, tels que les piétons et les cyclistes, pour partager et collecter des informations sur la route et ses environs.

2.4 Composants de l'IoV

L'écosystème de l'IoV est essentiellement composé de quatre (04) entités de base :

- **End points (terminaux) :** les véhicules, les smartphones, les capteurs ainsi que d'autres appareils connectés [11].
- **Infrastructure :** les unités routières (RSUs), les points d'accès Wi-Fi, les stations de base de réseaux cellulaires (4G/5G), les serveurs cloud / Fog, etc [11].
- **Opérations et protocoles :** les terminaux (les véhicules) sont de plus en plus souvent équipés d'un grand nombre de capteurs, d'actionneurs et de dispositifs de communication (appareils mobiles, GPS, ordinateurs embarqués). En particulier, de nombreux véhicules possèdent de puissantes capacités de détection, de mise en réseau, de communication et de traitement des données et peuvent communiquer avec d'autres véhicules ou échanger des informations avec les environnements externes par le biais de divers protocoles, notamment HTTP, TCP/IP, SMTP, WAP et NGTP (Next Generation Telematics Protocol) [10].
- **Services :** tels que la météo, les applications de gestion de trafic routier, la vidéo à la demande, le streaming, etc [11].

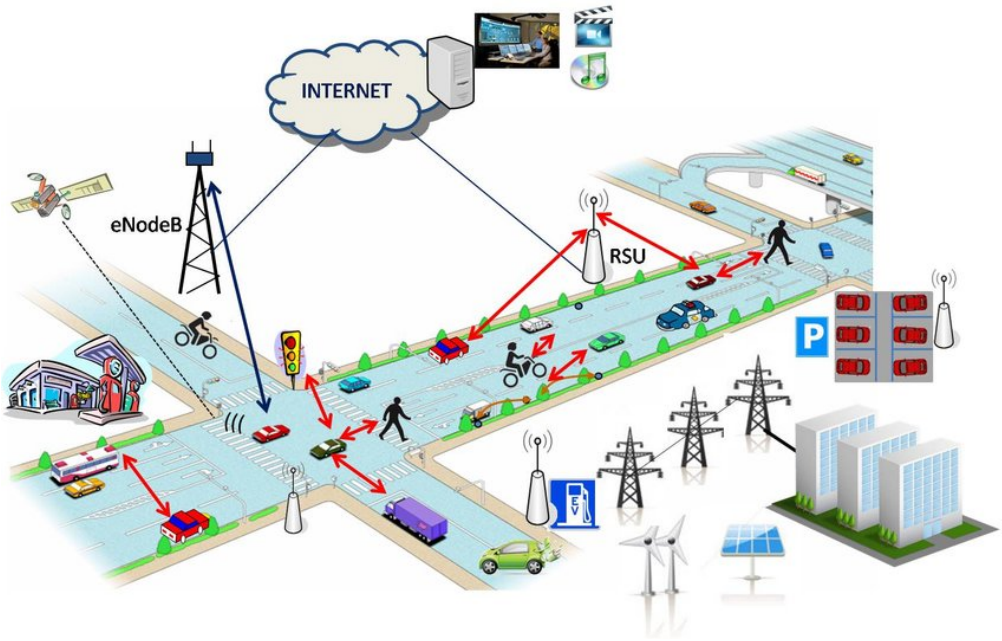


FIGURE 2.2 – L'internet des véhicules IoV [3].

2.5 Architecture IoV

Un réseau d'IoV est un système qui contient généralement trois (03) couches , qui sont représentées dans la figure 2.3 :

Couche 1 :la perception : Elle comprend tous les capteurs de moyens de collecte de données installés dans le véhicule. Cette couche collecte des données relatives aux événements, l'identification par radiofréquence (RFID) ,aux habitudes de conduite, perception du positionnement par satellite, perception de l'environnement routier, perception de la position du véhicule, perception de la voiture et des objets, etc.

Couche 2 :Réseau : C'est la couche de communication, qui représente les différentes technologies de communication hétérogène ; Donc, il garantit que le véhicule est connecté à

tous les réseaux telle que GSM, 5G, WiMax, WLAN, Wi-Fi et Bluetooth.

Couche 3 :Application

Cette couche est chargée d'analyser, de stocker, de traiter les informations relayées et de prendre des décisions en fonction de celles-ci. Elle comprend les applications de sécurité, de gestion de trafic et de confort comme ETC (Electronic Toll collection) et PTMP(Public Traffic Management System).

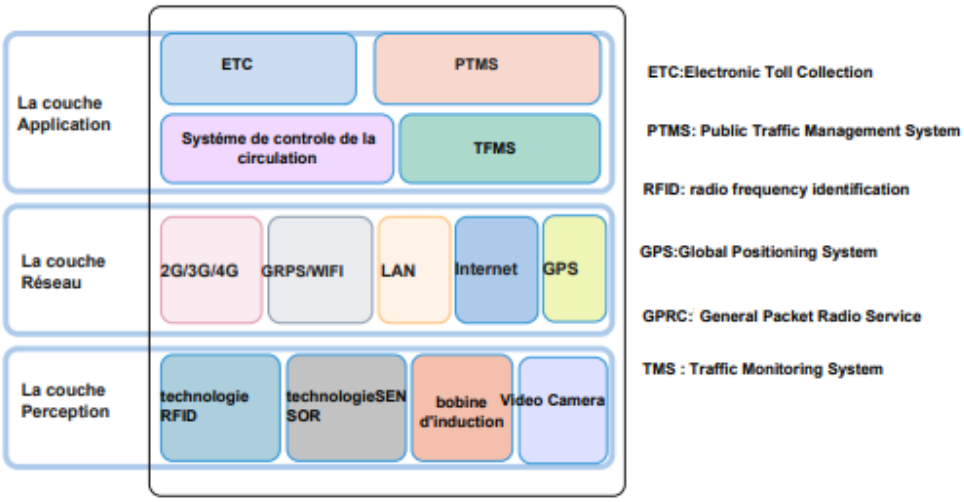


FIGURE 2.3 – Architecture de l'internet des véhicules[8].

2.6 Types de communications

Les interactions dans l'environnement IoV peuvent impliquer de nombreux appareils (à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule), qui peuvent communiquer entre eux, recueillir, échanger, stocker et analyser de l'information ou prendre des décisions avec un minimum d'interventions humaines. Dans leur architecture, ils également considéré cinq modes de communications réseau : qui sont représentées dans la figure 2.4 :

- **Les communications entre les véhicules et les capteurs** (vehicule to sensers, V2S) : le véhicule communique avec différents capteurs installés un peu partout sur l'entourage de véhicule tel que les capteurs installés sur les panneaux de circulations, sur les arrêts de bus et même avec les capteurs intégrés dans les routes pour récolter un ensemble d'information pour obtenir des mises à jour sur l'état de la circulation et de la chaussée de la route.
- **Les communications de véhicule à véhicule** (vehicule to vehicule ,V2V) : qui prennent en charge l'échange sans fil d'informations sur la vitesse et la position des véhicules environnants .
- **Les communications de véhicule à infrastructure** (vehicule to infrastructure,V2I) :qui prennent en charge l'échange sans fil d'informations entre un véhicule et les unités routières (RSU).
- **Les communications de véhicule au Cloud** (Vehicule to Cloud ,V2C) : qui permettent au véhicule d'accéder à des informations supplémentaires à partir d'Internet via des interfaces de programme d'application (API) .

• **Les communications entre véhicules et piétons** (vehicle to pedestrian, V2P) : les véhicules communiquent avec les appareils intelligents embarqués par les piétons dans la route comme les smart phones, smart watchs, etc. . .,qui prennent en charge la sensibilisation des utilisateurs vulnérables de la route (VRU) tels que les piétons et les cyclistes .

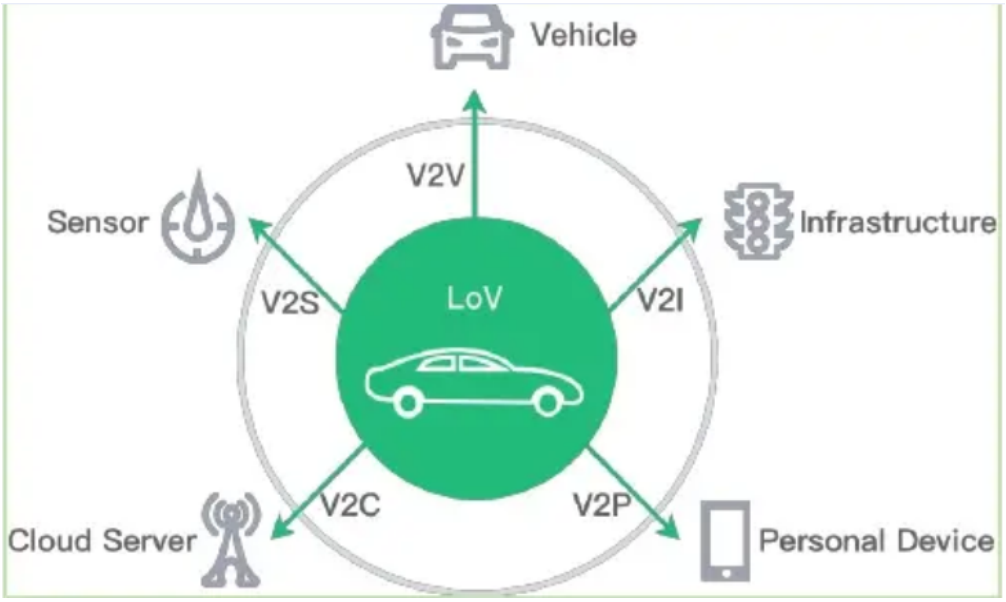


FIGURE 2.4 – Les cinq types de communication[8].

2.7 Applications d'IoV

Les applications embarquées peuvent être divisées en trois (03) catégories :

• **Applications de sécurité et de prévention routières :**

Ces applications sont conçues pour améliorer la sécurité des passagers sur la route et surveiller l'environnement à proximité (l'état des autres véhicules ou l'état des routes) en échangeant des informations entre véhicules. Ces types d'applications aident les conducteurs à faire face aux événements à venir ou aux dangers potentiels sur la route. Ceci est réalisé en envoyant des données collectées à partir de capteurs routiers et d'un Board Unit (OBU)du véhicule. Avec IoV peut également prévenir les collisions et intervenir sur les routes, détecter les obstacles (fixes ou mobiles) et diffuser les informations météorologiques en envoyant des messages d'alerte. Par conséquent, ce type d'application permet d'améliorer la latence et de réduire le temps de réponse des services d'urgence.

• **Applications de gestion du trafic :**

Ces applications utilisent la communication du véhicule pour partager des informations sur le trafic et l'état du trafic entre les véhicules afin d'optimiser le flux de trafic et d'améliorer l'expérience du conducteur. Plusieurs scénarios ont été proposés pour cette catégorie, dont la coopération entre véhicules pour faciliter le passage des véhicules d'urgence, ou des itinéraires alternatifs pour les véhicules dans les zones congestionnées pour optimiser et fluidifier le trafic.

• **Applications de confort et de divertissement :** Cette catégorie regroupe toutes les applications qui contribuent au confort du conducteur et des passagers. L'accès à Internet,

la messagerie, le chat de véhicule à véhicule, illustrent ce confort. Les passagers de la voiture peuvent jouer en ligne, télécharger des fichiers multimédias, regarder des films etc.

2.8 Protocole de routage dans IoT

L'Internet des objets contient un certain nombre de composants mobiles et fixes. Plusieurs problèmes surviennent lors du développement de protocoles de routage dans lesquels ces dispositifs communiquent entre eux. En outre, plusieurs facteurs dominent le comportement des protocoles de routage, ce qui rend difficile la conception d'un protocole unique qui atteint tous ces objectifs. Parmi les problèmes des protocoles de routage : les ressources limités, la topologie de routage dynamique, l'évolutivité dans IoT et la présence de partitions de réseau et vides dans le réseau .

Il y a plusieurs protocoles de routage récent dans IoT , on cite quelques protocoles :

AODV(AdHoc On-Demand Distance Vector Routing) est un routage à la demande basé sur IEEE802.11 pour les réseaux ad-hoc[5].

AOMDV(Ad-Hoc On-Demand Multipath Distance Vector Routing) est une extension de AODV ,conçu principalement pour les réseaux ad-hoc dynamiques [13].

"LOAD" est l'abréviation de "6LoWPAN AdHoc Routage de vecteur de distance à la demande ",c'est un protocole de routage à chemin unique basé sur AODV et adapté pour les réseaux LLN, et simplifie le protocole de routage pour le réseau maillé 6LoWPAN. [5]

RPL : c'est le protocole de routage le plus adapté et le plus utilisé pour les réseaux à faible consommation et à perte (LLN) est spécifiquement conçu pour les réseaux de capteurs sans fil (WSN) dans l'Internet des objets . Il fonctionne sur la couche IPv6 6LoWPAN au - dessus 802.15.4 standard de réseau sans fil . Le protocole est divisé en un moteur de transfert qui utilise une table de routage pour décider quel nœud voisin est le prochain saut pour un paquet donné et un protocole de routage qui remplit une table de routage à chaque noeud . Le protocole de routage fonctionne en attribuant à chaque noeud un rang , de sorte que le rang d'un noeud augmente plus le nœud est distant du routeur de bordure . Cela crée un graphe des chemins de communication à travers le réseau appelé un graphique acyclique dirigé orienté vers la destination (DODAG)[2].

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini l'internet des véhicules avec : ses composants, son architecture, les types de communications,ses applications et les protocoles de routage utilisés dans IoT.

L'internet des véhicules représent une technologie prometteuse qui est devenue dominante dans le monde, mais la particularité de ses composants nécessite d'utiliser certains protocoles pour permettre la communication des véhicules entre eux.La communication entre ces objets est caractérisée par de faibles débits, des taux de perte élevés et une instabilité de réseau forte, Un protocole qui prend en compte toutes ces caractéristiques et le plus adapté pour les réseaux LLNs est le protocole RPL. Pour cela,il sera l'objet de chapitre suivant qu'on va définir dedans ce protocole de routage RPL avec une présentation détaillée de son fonctionnement.

Chapitre 3 :
Description du protocole RPL

Chapitre 3

Description du protocole RPL

3.1 Introduction

L'apparition de l'Internet et les recherches dans le domaine des technologies sans fil ont permis de doter des capteurs qui permettent de quantifier et surveiller une valeur physique de façon locale avec une certaine connectivité, ceci a donné naissance aux réseaux de capteurs sans fil composés de plusieurs systèmes embarqués de détection qui communiquent et permettent différentes applications, telles que la construction intelligente, la surveillance de l'habitat et l'automatisation industrielle .

Les réseaux LLN (Low Power and Lossy Network) caractérisés avec des nœuds capteurs qui ont des ressources limitées : une faible portée de communication, une puissance de calcul limitée, une faible capacité de mémoire de stockage, et plus souvent une batterie à durée de vie limitée, les protocoles de routage doivent être bien conçus, car les protocoles ont un impact sur l'utilisation des ressources et la consommation d'énergie du nœud. En plus de fournir une livraison fiable et efficace, les algorithmes de routage doivent prendre en compte l'efficacité énergétique afin de prolonger la durée de vie du réseau.

L'organisme en charge de la standardisation des protocoles de l'Internet, a donc créé plusieurs groupes de travail afin de spécifier des protocoles interopérables pour les réseaux composés d'appareils fortement contraints. En 2012 le groupe ROLL a publié la RFC 6550, qui spécifie un protocole de routage RPL permet de construire une topologie de routage sur les réseaux LLN.

3.2 Le principe de protocole RPL

Le protocole RPL a été développé pour des systèmes à ressources limitées et pour les systèmes qui se caractérisent par l'instabilité des connexions entre les nœuds à cause de présence d'obstacles, RPL est un protocole de routage proactif, basé sur un algorithme à vecteur de distance qui construit un DODAG pour l'acheminement des données vers la station de base, les protocoles à vecteur de distance permettent de fonctionner avec un minimum de ressources. En effet, les informations de routages à stocker correspondent seulement au voisinage, contrairement aux protocoles à état de liens qui nécessitent de connaître les caractéristiques des liens de l'ensemble des nœuds du réseau.

3.3 Construction de la topologie

RPL organise la topologie grâce au graphe acyclique dirigé DAG en tant que graphe sans cycles, c'est une topologie dynamique, optimisée avec l'évitement des boucles et la considération des paramètres de qualité de service pour l'acheminement des datagrammes IPv6 depuis et vers le nœud racine. Pour construire la topologie, RPL utilise un type particulier de DAG : DODAG graphe acyclique orienté dirigé vers une destination qui est la racine de réseau, cette topologie logique est un arbre couvrant ou la racine est le nœud capteur appelée DODAG racine. Chaque nœud choisit parmi ses voisins un ensemble de successeurs et un parent préféré . L'ensemble des successeurs étant les voisins proposant une bonne métrique et le parent préféré étant le voisin optimisant cette même métrique.

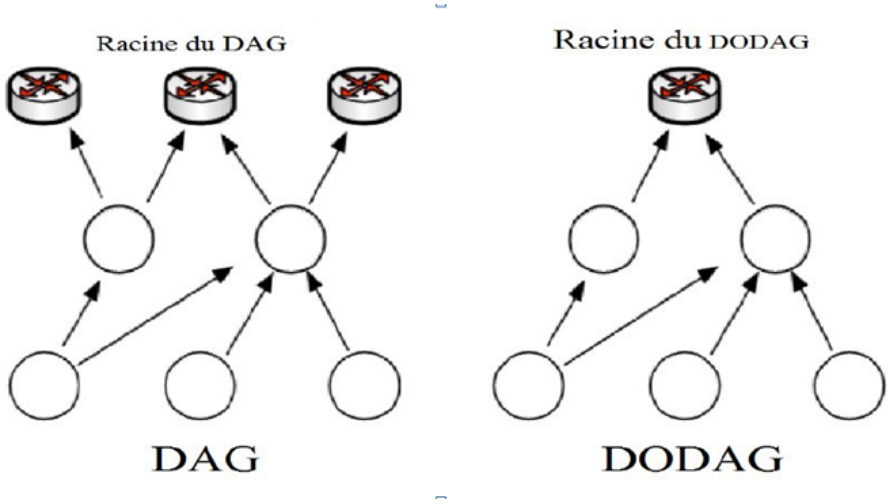


FIGURE 3.1 – Graphe DAG et DODAG[15] .

Protocole RPL utilise 3 paramètres pour organiser et identifier une topologie :

- **RPLInstanceID :** identifiant d'une instance RPL, on dit des DODAG partagent le même RPLInstanceID qu'ils appartiennent à la même instance RPL.
- **DODAGID :** identifiant d'un DODAG racine, il est égale à l'adresse IPv6 de la racine RPL.
- **DODAGVersionNumber :** il est utilisé pour caractériser la version d'un DODAG racine .

3.3.1 Formation des routes montantes

Dans un réseau opéré par RPL, au moins un nœud est configuré pour être un DODAG racine. Pour construire un DODAG, la racine envoie un message DIO contenant des informations comme l'identifiant du DODAG et la métrique utilisée à tous ses voisins. Ces nœuds à portée de communication de la racine recevront et traiteront ce message DIO, le nœud prend la décision basée sur certaines règles pour savoir s'il doit rejoindre le DODAG ou non. Dans le cas où le nœud rejoint le DODAG, il détermine tout d'abord ses voisins. Il choisit ensuite parmi ses voisins son parent en fonction de la métrique de routage ,de la fonction objective et son rang dans le DODAG. Le nœud choisit aussi parmi son ensemble de voisins des parents de substitution (appelée Feasible Successors). Dans le cas, où le parent n'est plus joignable, un des parents de substitution le remplacera dans le DODAG.

Le nœud transmet ensuite à son tour un message DIO à ses voisins. Ce processus est répété par l'ensemble des nœuds du graphe jusqu'à ce que le DODAG soit construit.

Les champs d'un DIO :

Les messages DIO sont envoyés de manière périodique depuis le nœud racine vers tous ses nœuds voisins.

Les champs principaux du message DIO sont :

- **RPLInstanceID :** pour identifier l'instance RPL de l'émetteur de DIO.
- **Version Number :** qui sert à connaitre la version du DODAG de l'émetteur.
- **Rang :** qui correspond au rang de l'émetteur du DIO.
- **MOP :** ce champ détermine le mode opératoire de RPL,ce paramètre est défini de manière administrative au moment de la configuration de protocole RPL.
- **Prf :** drapeau qui définit la préférence d'une racine DODAG comparée à d'autres racine DODAG .
- **DODAGID :** adresse IPv6 du DODAG racine qui identifie de manière unique un DODAG .

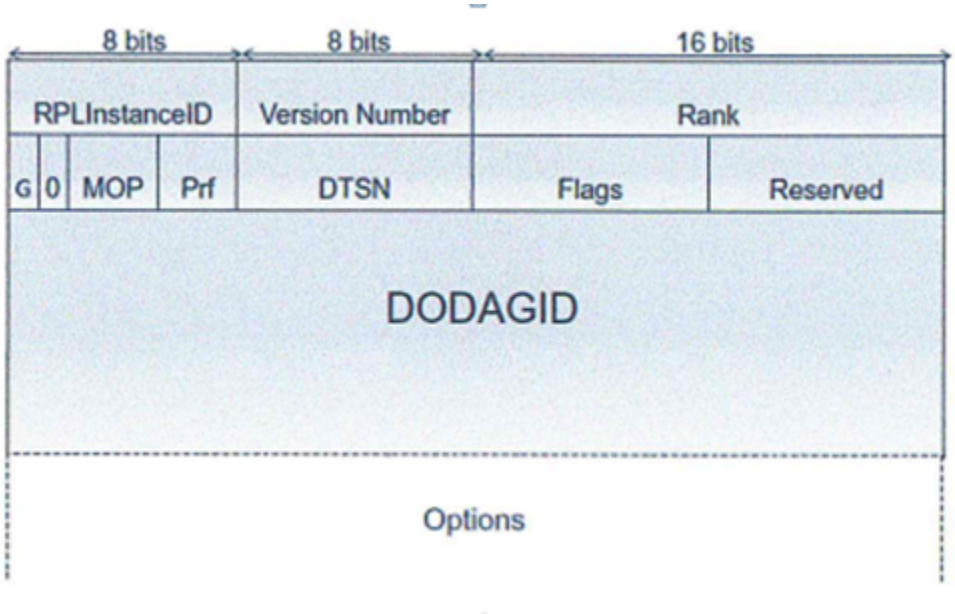


FIGURE 3.2 – Format de message DIO[20]

Formation spontanée des routes montantes

Lorsqu'un nœud demande l'émission de message DIO à son voisinage afin d'obtenir spontanément les informations nécessaires à la construction des routes montantes, un DIS peut être envoyé lors de démarrage d'un nœud afin qu'il joigne le DODAG.

3.3.2 Formation des routes descendantes

Les routes descendantes sont les routes depuis la racine RPL vers les nœuds construites optionnellement grâce au message DAO,ces derniers contiennent la destination atteignable

via un nœud, deux modes peuvent être utilisés pour construire les routes descendantes :

- **Mode non Storing :** seule la racine de DODAG possède des routes dans le sens descendant, ce mode est utilisé dans les environnements très contraints ou la puissance des nœuds ne leurs permet pas d'envisager de stocker les routes descendantes dans leurs tables de routage, donc les DAO sont envoyés au parent préféré qui installe à la réception la route descendante correspondante, le DAO se propage jusqu'à la racine à travers les parents préférés.
- **Mode Storing :** chaque nœud installe une route descendante, ce mode consomme plus de ressources, chaque nœud doit être capable de stocker les informations de routage nécessaires aux routes descendantes, donc le parent préféré n'installe pas de routes descendantes,tous les nœuds intermédiaires se contentant d'acheminer le DAO jusqu'à la racine.

Les champs d'un DAO :

Les messages DAO sont envoyés par un fils à un parent pour demander la permission de rejoindre le DODAG, le format des messages DAO est présenté dans la figure :

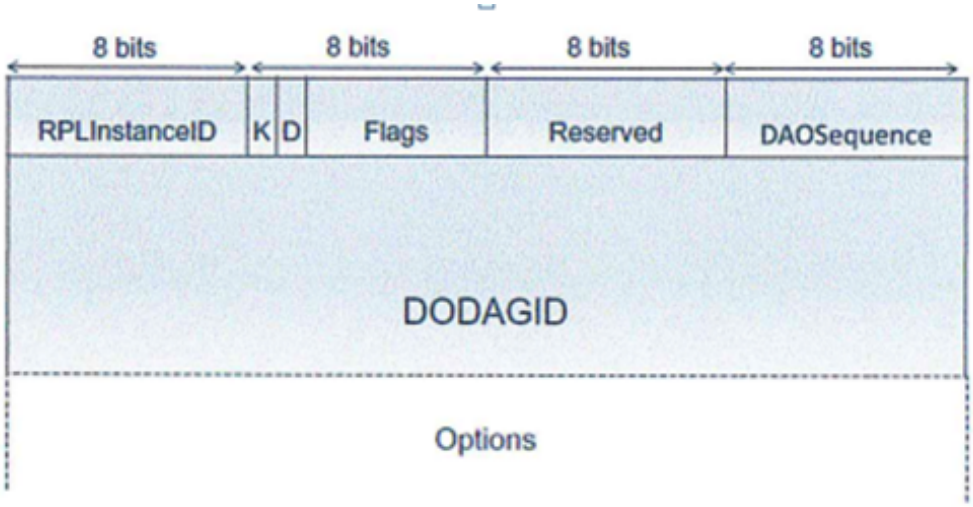


FIGURE 3.3 – Format de message DAO[20].

- **RPLInstanceID :** un champ de 8bits indique l'instance de topologie associé au DODAG.
- **K :** indique que le destinataire doit retourner un message DAO-ACK.
- **D :** indique que le champs DODAGID est présent. Ce drapeau doit être défini quand un RPLInstanceID local est utilisé.
- **Flags :** ce champ doit être initialisé à zéro par l'expéditeur et doit être ignoré par le récepteur.
- **DAOSequence :** incrémenté à chaque message DAO unique à partir d'un nœud et écho dans les messages DAO-ACK.
- **DODAGID :** un entier qui identifie de manière unique un DODAG, ce champ n'est présent que lorsque l'indicateur 'D'est activé. Ce champ est généralement seul présent lorsqu'un RPLInstanceID local est en cours d'utilisation, afin d'identifier le DODAGID qui est associé au RPLInstanceID, lorsqu'un l'ID RPLInstance global est utilisé, ce champ ne doit pas nécessairement être présent.

— Suppression des routes descendantes :
Un type spécial de message DAO,appelé No-Path DAO sert à effacer une route descendante dans le mode storing, le DAO comprend la Target Option dont la route doit être désinstallée et une option Transit information avec une durée de vie mise à zéro.
— Acquittements des messages DAO (DAO-ACK) :
L'acquittement est demandé par un nœud explicite en destinataire du message DAO quand il envoie un message DAO, le message DAO-ACK pour informer l'émetteur de DAO que la route montante a été correctement installée. Le format de message DAO-ACK est présenté dans la figure 3.4

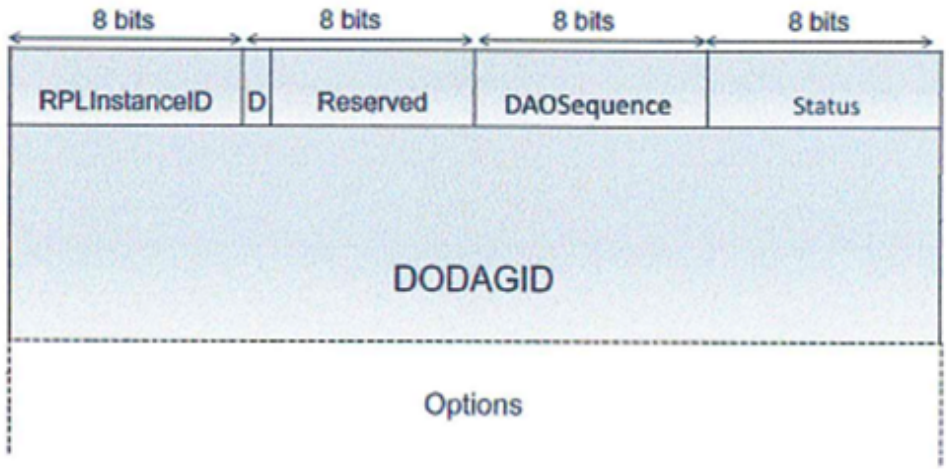


FIGURE 3.4 – Format de message DAO-ACK[20].

3.4 Maintenance de la topologie

Afin de réagir aux eventuelles pannes de réseau qui se produisent lorsque son comportement devient inconsistant et ne fournit pas le résultat voulu, la panne est une conséquence d'une ou plusieurs erreurs, RPL dispose de deux mécanismes pour la réparation :

3.4.1 Réparation globale

La réparation globale est déclenchée que par la racine RPL,se fait par l'incrémentation de numéro de version de DODAG en autorisant tous les nœuds du réseau à choisir une nouvelle position dans le DODAG , et une nouvelle topologie est construite.

3.4.2 Réparation locale

Ce mécanisme est utilisé par un nœud pour qu'il choisisse le parent préféré sans prendre en compte son propre rang.

3.5 Métrique de routage

Une métrique ou contrainte de routage une quantité scalaire utilisée pour trouver le coût d'un chemin et pour bien choisir un parent lorsqu'il existe plusieurs chemins disponibles. Dans cette section, nous décrivons quelques métriques :

3.5.1 Message de contrôle (Overhead) :

C'est le nombre total de messages de contrôle transmis par les nœuds afin de créer un DODAG. Les messages de contrôle contiennent les messages DAO, DIS et DIO. Il peut être calculé comme suit :

$$ControlTrafficOverhead = \sum_{i=1}^{n} DIO + \sum_{i=1}^{n} DIS + \sum_{i=1}^{n} DAO$$

La stabilité du réseau peut être déduite par cet indicateur, au plus sa valeur est faible au plus le réseau est stable. Le contrôle du trafic a un impact direct ou indirect sur la consommation de ressources du réseau. Par exemple, lorsque le réseau devient plus dense, il permet d'avoir une congestion et une collision entre les paquets, ce qui rend le réseau plus lent et donc moins performant. Ce qui est problématique car cela pousseles nœuds à envoyer plus de messages afin de vérifier la disponibilité du réseau ce qui inévitablement les force à dépenser plus de puissance et consommer plus de ressources.

3.5.2 Taux de perte de paquets(PLR) :

C'est le nombre de paquets perdus pendant la transmission des messages entre les nœuds. Il peut êtrecalculé comme suit :

$$PacketsLossRatio = \sum_{i=1}^{n} SentPackets - \sum_{i=1}^{n} RecievedPacket$$

3.5.3 Energie de nœuds :

C'est l'énergie mesurée sur les nœuds du réseau par rapport à la durée de vie du réseau. La formule utilisée pour calculer l'énergie des nœuds est :

$$Energy(mJ) = \frac{Transmit \times 19.5mA + Listen \times 21.5mA + CPUtime \times 1.8mA + LPM \times 0.0545mA) \times 3}{32768}$$

La consommation d'énergie est l'un des enjeux majeurs des réseaux de l'IoT, la réduire est alors une despriorités de la fonction objective. L'OF peut alors sélectionner l'itinéraire vers la racine en fonction de la consommation énergétique de ses parents.

Cette métrique est donc la principale à prendre en compte dansle contexte d'une application efficace au niveau énergétique.

3.6 Fonction objective

L'une des spécifications de RPL est de créer une route vers la racine en fonction de la fonction Objective. Pour cette raison, l'OF est considérée comme le facteur clé pour déterminer, dans le réseau, le parent préféré du nœud voisin. Un nœud peut avoir plus d'un parent en particulier dans un réseau avec une énorme densité. Pour cela, la fonction Objectif essaie de choisir quel parent est adapté pour un nœud que d'autres. En outre, le choix de parent par la fonction objectif est basé sur un ou plusieurs critères spécifiques qui sont des métriques. Ces métriques peuvent être spécifiées par le concepteur en fonction de ses besoins. Jusqu'à présent, le groupe de travail ROLL a spécifié deux fonctions objectives :

3.6.1 Fonction objective zéro

Le but de OF0 est pour un nœud de sélectionner le DODAG qui offre une assez bonne connectivité à un ensemble spécifique de nœuds (DODAG à joindre) bien qu'il n'y ait aucune garantie que le chemin sera optimisé en fonction d'une métrique spécifique. OF0 sélectionne un parent préféré ou un successeur possible s'il est disponible. Tout le trafic ascendant est normalement acheminé via le parent préféré sans tentative d'équilibrage de la charge.

Lorsque les conditions de liaison ne permettent pas la transmission ascendante à travers le parent préféré, le paquet est passé au successeur possible sélectionné un peu plus tôt.

3.6.2 Le rang minimum avec fonction objective d'hystérésis

Le MRHOF est conçu pour trouver les chemins ayant le plus petit coût tout en empêchant un taux de désabonnement excessif dans le réseau. Il le fait en utilisant deux mécanismes. D'abord, il trouve le chemin de coût minimum. Deuxièmement, il ne bascule vers ce chemin de rang minimum que s'il est plus court que le chemin actuel d'au moins un seuil donné. Ce deuxième mécanisme est appelé "hystérésis". Dans MRHOF la sélection des parents est améliorée et cette sélection se produit dans le cas suivant :

- Pendant la formation initiale du réseau.
- Lorsque le coût du chemin vers les nœuds voisins change.
- Un nouveau nœud apparait dans le voisinage du nœud.

3.7 Classification

Plusieurs protocoles et métriques de routage ont été recommandés pour les réseaux LLN. Ainsi, la spécification de RPL a laissé le choix de métrique ouvert aux implémentations, les fonctions objectives standards de RPL (OF0 et MRHOF) ont défini certaines recommandations sur leurs implémentations sans préciser les paramètres de routage, dans cette section nous proposons une classification des différentes implémentations :

- **Routage :**

Unipath :les protocoles de chemin unique choisissent un meilleur chemin pour chaque destination, ces protocoles sont incapables d'équilibrer la charge dans un réseau.

Miltipath : les protocoles multi-chemins permet de sélectionner plus d'un chemin pour une destination, ces protocoles sont capables et préférables pour un équilibrage de charge entre les nœuds.

- **Métrique :** certaines fonctions objectives proposées peuvent utiliser plus d'une métrique pour la sélection des chemins préférés. Tandis que, d'autres utilisent qu'une seule métrique de routage soit le nombre de sauts soit l'ETX.
- **Mobilité :**

le protocole RPL a été essentiellement créé pour les réseaux statiques et avec une faible réactivitéà la mobilité. Un cas d'incohérence est lié à une panne de nœud ou à un mouvement physique, qui provoque un changement dans la topologie. Conformément à la spécification de la norme RPL, lorsquece problème se produit, le nœud se détache de tous ses nœuds connectés et perd sa capacité de transfert de données. Ainsi, il ne pourra pas garder les informations des voisins et chemins de routage (liste des voisinages, liste des parent, parent préféré et rang). Ce processus augmente la latence de transmission des données. Pour faire face à ce problème, le RPL peut réagir par plusieurs stratégies quiconsistent à mettre à jour dynamiquement les décisions de routage et à s'adapter à l'évolution du réseau.

- **Communication :**

Unicast :il s'agit d'une communication où il n'y a qu'un seul expéditeur et un seul récepteur.

Multicast : il s'agit d'une communication où le même paquet de données est envoyé simultanément à plusieurs récepteurs dans le réseau.

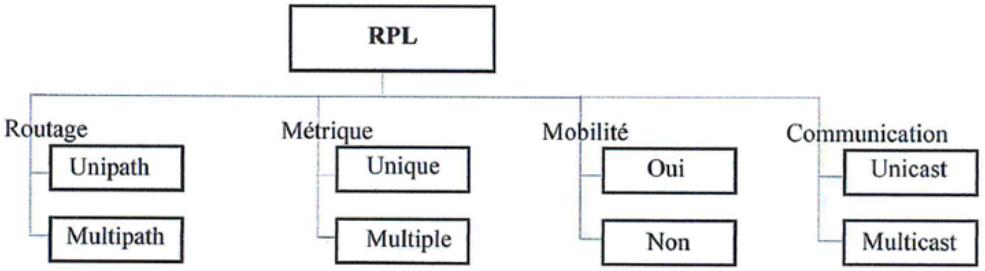


FIGURE 3.5 – Diagramme de classifaction[20].

3.8 Construction de DODAG

Tout d'abord, l'initialisation de RPL se fait lorsque le nœud se réveille et réinitialise les temporisateurs appropriés et envoie un message DIS sollicitant un message DIO du voisin le plus proche, ce dernier recevra le message DIS et répond avec un message DIO, le premier nœud reçoit le message DIO et traite ce message pour rejoindre le DODAG de l'expéditeur DIO et choisir le parent préféré parmi les parents candidats.

Au temps que le nœud prend la décision de rejoindre ce DODAG, et choisir son parent préféré selon la fonction objective proposée, et connaitre son chemin par défaut vers la racine DODAG. Ensuite, ce nœud enverra un message DAO vers le haut pour s'annoncer sur le réseau et il sera reconnu par un message DAO-ACK. Ainsi, lors de la progression de la transmission des données les chemins sont renforcés positivement, ce qui rend une sélection supplémentaire possible.

Les nœuds pourraient échouer à cause d'épuisement de leur énergie, ce qui provoque la rupture de lien. Cependant, la probabilité qu'un chemin soit préférable diminue automati-

quement et, par conséquent, l'utilisation des routes alternatives qui se trouve au cours de construction de DODAG sera nécessaire, les routes alternatives sont périodiquement vérifiées pour leurs validités. La figure 3.6 montre le schéma de séquence pour RPL.

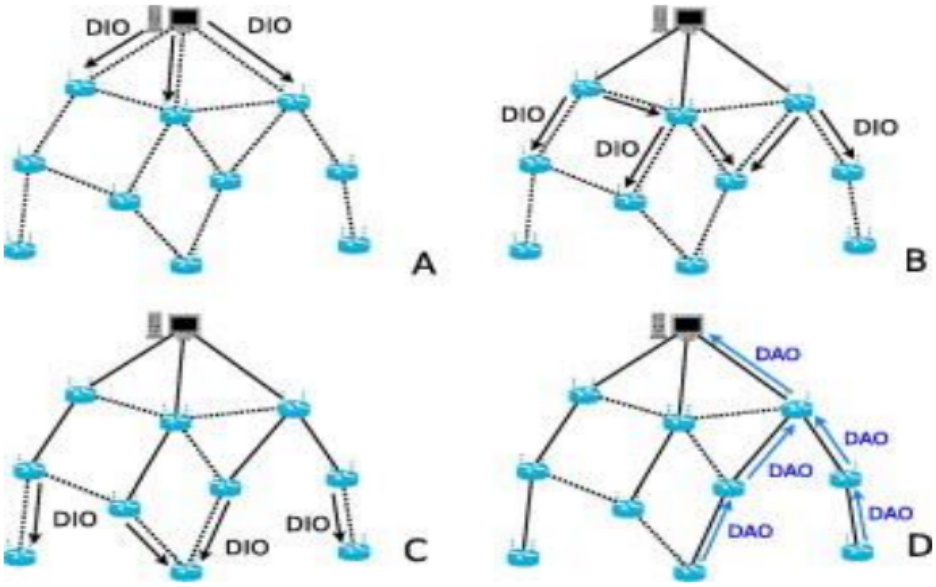


FIGURE 3.6 – Construction de DODAG[18].

3.9 Qualité de service avec protocole RPL

La performance du réseau est un facteur fondamental et nécessaire pour une utilisation efficace des applications nécessitant une qualité de service (QoS) et même les applications en temps réel.

L'utilisation de telles applications dans réseau LLN a suscité beaucoup d'intérêt.

3.9.1 Etat de l'art :

Le protocole RPL fait l'objet d'un grand intérêt, notamment en termes d'enjeux, depuis sa standardisation par le groupe de travail ROLL de l'IETF en 2012 dans la gestion de l'énergie et de la qualité de service dans les réseaux LLN. Par conséquent, de nombreux travaux, qui ont résolu des problèmes d'optimisation pour améliorer l'efficacité d'énergie et la qualité de service. De plus, bien qu'il existe deux fonctions objectifs standards MRHOF et OF0.

Ainsi, plusieurs travaux proposent de nouvelles fonctions objectives surtout ceux basées sur une combinaison de plusieurs métriques en assurant des compromis entre les paramètres de performance de réseau.

- **SIGMA-ETX :** c'est une fonction objective, qui consiste à adapter une métrique spécifique pour le protocole RPL dans la fonction objective MRHOF. Cependant, l'adaptation proposée optimise les deux fonctions objectives standards de protocole RPL MRHOF et OF0, ceci via une nouvelle métrique qui s'appelle SIGMA-ETX dans laquelle le meilleur itinéraire est calculé à l'aide de l'écart type des valeurs ETX entre les nœuds, au lieu de travailler avec la moyenne ETX le long de la route. Cette méthode donne de meilleurs résultats par

rapport aux fonctions objectives OF0 et MRHOF en termes de taux de livraison de paquets, de latence du réseau et de consommation d'énergie[22].

- **OF- FL :** c'est une fonction objective, qui est basée sur la logique floue, surmonte les limitations de la norme RPL. Ainsi, elle permet de sélectionner les meilleurs chemins vers la destination [9].
- **SCAOF :** c'est une fonction, qui sert à calculer le classement et la sélection des parents préférés à l'aide d'une règle fondamentale qui définit comment utiliser des informations contextuelles. Ainsi, cette fonction peut gérer les constructions initiales et les mises-à-jour d'un arbre RPLDODAG. Cette règle est conçue par des méthodes et des contraintes de routage. C'est une approche hautement évolutive et flexible. Cependant, SCAOF utilise la fonction objective standard MRHOF de manière plus contextuelle [6].
- **ALABAMO :** c'est une fonction objective, qui vise à équilibrer le trafic en utilisant à la fois le profil de trafic des nœuds et l'ETX des liaisons afin de prolonger la durée de vie de réseau et réduire jusqu'à la moitié de la consommation d'énergie des nœuds [17].
- **LQL (Link QualityLevel) :** c'est une fonction objective, qui utilise le niveau de qualité de lien LLQ (ETX) pour réduire le nombre de changements parents et minimiser la consommation d'énergie mais n'offre pas une bonne performance en termes de délai moyen en bout en bout et de taux de livraison de paquets[24].
- **FMOF (FuzzyMobility Objective Function) :** Les itinéraires sont mis à jour plus fréquemment sur la base d'informations plus précises générées par FMOF optimisé. Cette fonction améliore le délai moyen de transmission, le taux de réception de paquets et fournir une bonne connectivité en termes de délai [23] .

3.9.2 Critiques et solution :

L'implémentation initiale de protocole RPL ne spécifie aucun mécanisme pour garantir une bonne qualité de service. Cela provoque une congestion dans le réseau avec une éventuelle perte de paquets surtout avec le support de mobilité. Ainsi, il provoque une grande consommation énergétique par les capteurs, ces derniers sont contraints à des ressources. Pour faire face à ces problèmes, une extension de ce protocole est nécessaire à intégrer.

Contrairement aux travaux précédents notre mémoire vise à se concentrer sur une méthode totalement autonome et nouvelle pour garantir une qualité de service dans l'IoV en utilisant le protocole RPL comme protocole de routage avec une extension d'amélioration proposée.

cette solution proposée est nommée RPL_QoS(ETX-EN),elle est basée sur l'introduction d'une nouvelle métrique qui s'appuie sur une combinaison de la métrique de qualité de lien avec celle de l'énergie, ce qui permet de faire un compromis entre l'efficacité énergétique et le taux de livraison de paquets dans le réseau. Par conséquence, cette amélioration permet d'assurer la qualité de service du protocole RPL.

3.10 Conclusion

La qualité de service est un ensemble de mécanismes de gestion visant à optimiser les ressources du réseau et à garantir d'excellentes performances.

Dans ce chapitre nous avons présenté le protocole de routage RPL et sa qualité de service en faisant un aperçu sur les travaux de recherche effectués sur ce protocole.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier les performances de protocole RPL et les évaluer à l'aide de simulateur Cooja.

Chapitre 4 :
Evaluation et amélioration des performances du protocole RPL dans l'IoV

Chapitre 4

Evaluation et amélioration des performances du protocole RPL dans l'IoV

4.1 Introduction

Pour évaluer les performances de protocole RPL, nous avons déployés deux scénarios de routage : le premier, le routage avec la métrique ETX la version la plus répandue de protocole RPL. Et le second, le routage par la métrique énergie, puis nous implémentons l'amélioration proposée qui consiste à combiner les deux métriques de rouage dans le but de prendre en considération la qualité de service dans le contexte de routage RPL.

Les scénarios ont été réalisés par des outils logiciels spéciaux pour les systèmes à ressources limitées : un système d'exploitation CONTIKI et le simulateur COOJA.

4.2 Outils de simulation

4.2.1 Présentation de CONTIKI :

Contiki est un système d'exploitation open-source, intégré, modulaire, léger, flexible, générique destiné aux réseaux de capteurs. Ce système a été développé par un groupe de développeurs de l'industrie du centre suédois SICS en 2004... Il est constitué d'un noyau, de bibliothèques, d'un ordonnanceur et d'un jeu de processus contrôle est de gérer les ressources physiques telles que le processeur, la mémoire, les périphériques informatiques(d'entrée/sortie). Il fournit aux applications informatiques des interfaces permettant d'utiliser ces ressources. Conçu pour les modules de capteurs sans fil miniatures, il occupe peu d'espace en mémoire et permet une consommation électrique très faible.

Contiki offre deux types de connectivité :

- **La couche Rime :** elle permet un dialogue vers les capteurs voisins ainsi que le routage.
- **La couche uIP :** orientée Internet, elle offre les services essentiels du protocole IP mais nécessite plus de ressources que Rime.

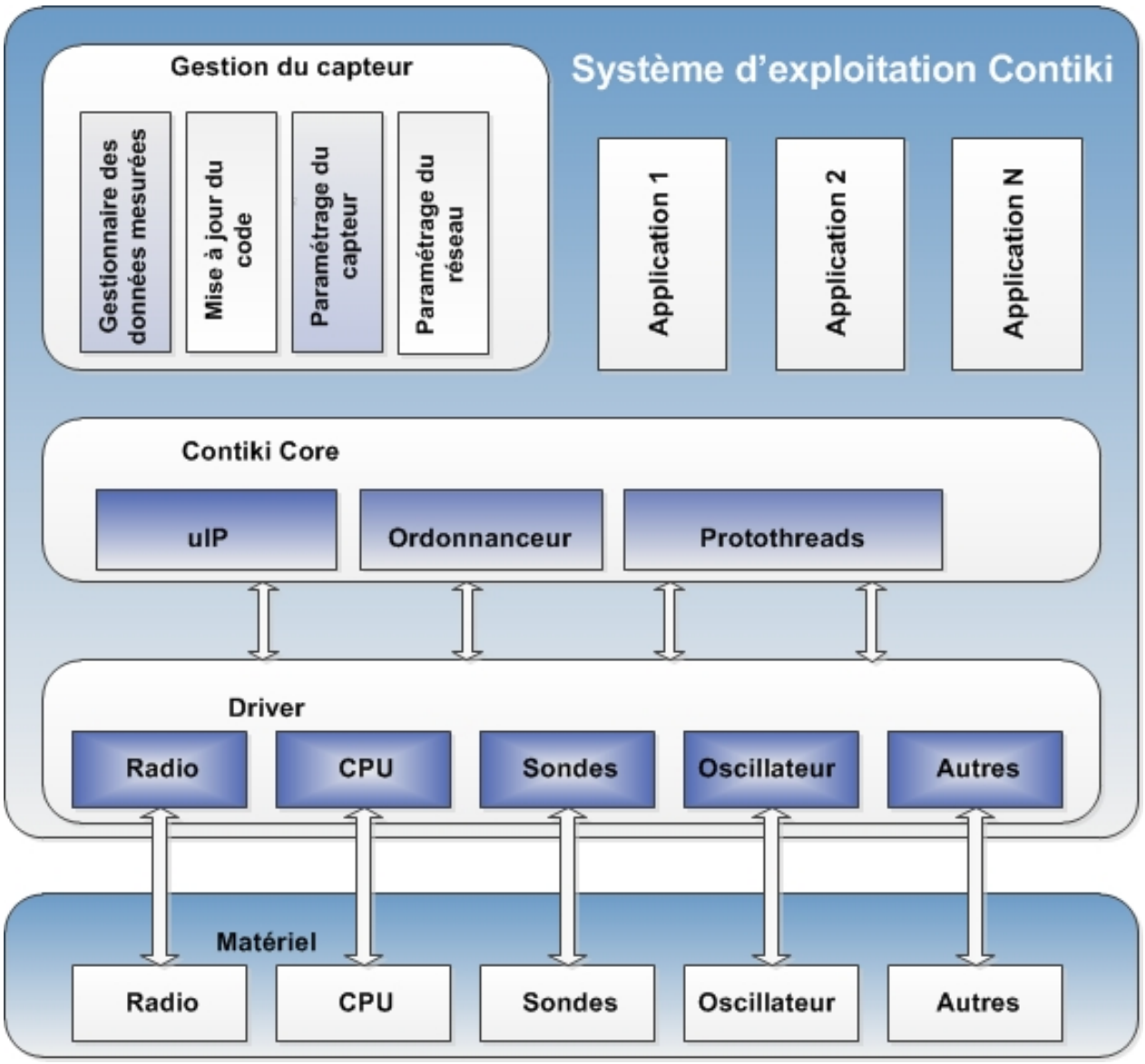


FIGURE 4.1 – Architecture de Contiki [7]

4.2.2 Simulateur COOJA :

Cooja est un simulateur extensible basé sur Java capable d'émuler des nœuds de différents type (exemple : Tmote, Sky, wismote...), conçu pour simuler des réseaux de capteurs qui prend en charge Technologie 6LoWPAN exécutant dans le système d'exploitation Contiki. Ce simulateur a beaucoup scénario et code open source à l'intérieur qui peuvent changer le code et les paramètres facilement.

Un nœud simulé dans Cooja a trois propriétés de base :sa mémoire de données, le type de nœud et son périphérique matériel. Le type de nœud peut être partagé entre plusieurs nœuds et détermine des propriétés communes à tous ces nœuds.

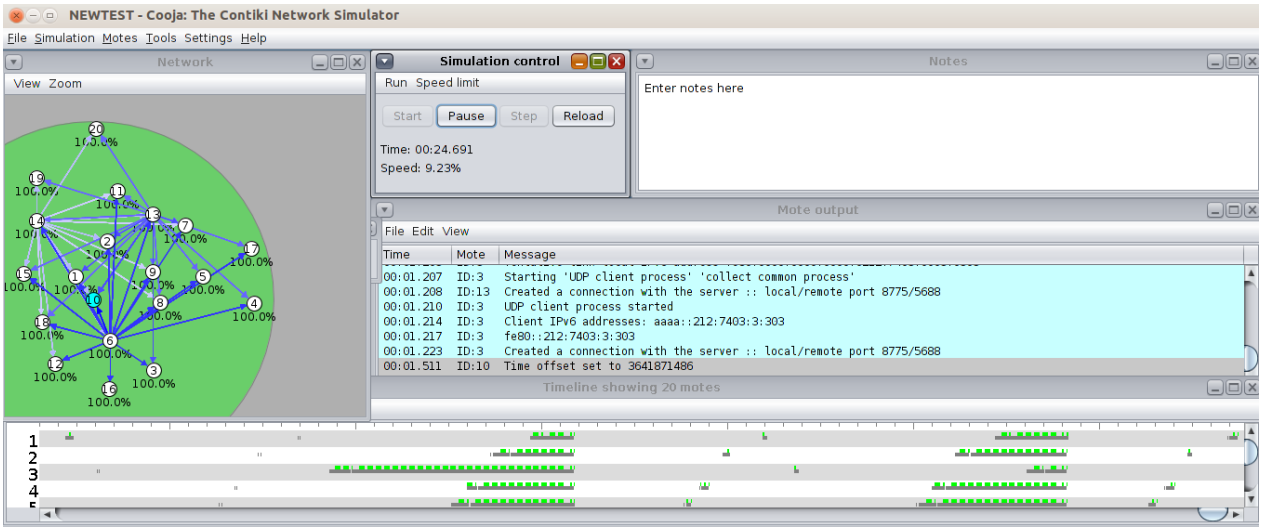


FIGURE 4.2 – Interface graphique de Cooja.

Dans une simulation nous avons plusieurs fenêtres :

- **Network :** présente le réseau simulé et le flux de communication durant la simulation.
- **Timeline :** en bas de l'écran, nous affiche tous les événements de communication dans la simulation dans le temps, très pratique pour comprendre ce qui se passe dans le réseau.
- **Mote Output :** présente ce que les capteurs génèrent comme sortie via leurs ports séries.
- **Notes :** est l'endroit où nous pouvons mettre des notes pour notre simulation.
- **Simulation control :** là où nous pouvons lancer, mettre en pause et charger de notre simulation.

4.3 Environnement de simulation

Dans cette partie nous présentons les différents paramètres qui sont résumés dans le tableau 4.1 afin de simuler les expériences envisagées, en effet les simulations sont faites graduellement sur un réseau de 10 à 50 nœuds déployées de façons aléatoire de type skymote, avec un seul nœud racine, chaque nœud de réseau va générer un paquet par seconde. Pour évaluer le fonctionnement de chaque métrique nous utilisant l'énergie consommée dans le réseau et l'indicateur de qualité de lien ETX ainsi le taux de livraison de paquets comme paramètres de test des performances de protocole RPL.

Paramètres de simulation	Valeurs
Simulateur	Cooja
Nombre de nœuds	[10-20-30-40-50]
Nombre de nœuds racines	1
Durée de la simulation(ms)	200000
Identité du nœud racine	1
Surface (mètres)	60x60
La fonction objective	MRHOF
Random seed	123.456
Délai (ms)	1.000
Type des noeuds	Sky mote
Radio Environment	UDGM (Distance Loss)
Topologie	Random

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

4.3.1 Lancer Cooja :

Accéder au dossier contiki/tools/cooja depuis le terminal et lancer la commande sudo ant run pour ouvrir une interface graphique Cooja.

4.3.2 Démarrer une simulation :

Depuis le Menu déroulant : File > New simulation

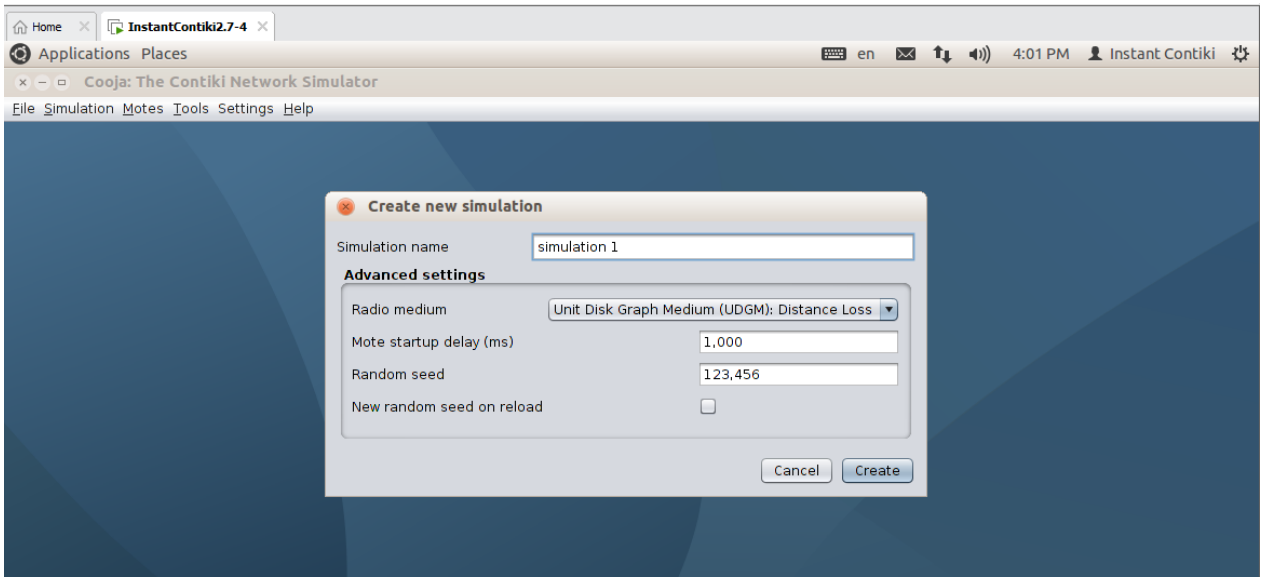


FIGURE 4.3 – création d'une nouvelle simulation.

4.3.3 Créer des nœuds :

Nœud racine : mote→ skymote→ udpsink.c de (examples/ipv6/rpl-collect).
Nœud sender :mote→ skymote→ udpsender.c de (examples/ipv6/rpl-collect).

On peut ensuite ajouter le nombre de nœuds souhaité.

4.4 Indicateurs de performances

Ces indicateurs sont des métriques et des paramètres de test de protocole de routage qui permettent de mesurer les performances de celui-ci, voici les métriques prises pour notre étude :

- **L'énergie consommée :** c'est la quantité d'énergie moyenne utilisée par l'ensemble des nœuds de réseau.
- **Taux de réussite (PDR) :** est un rapport entre le nombre de paquets de données livrées à la racine et le nombre de paquets envoyés par les différents nœuds du DODAG.

$$Tauxderéussite = \frac{Nombredepaquetsreçus}{Nombredepaquetsémis}$$

- **Nombre de transmissions attendu (ETX) :** est défini comme le nombre attendu de transmissions qui sont nécessaires afin d'envoyer un paquet sur la liaison de communication. Le chemin ETX est la somme des ETX de tous les liens le long du chemin, l'ETX se calcule comme suit :

$$ETX = \frac{1}{D_{f\times}D_r}$$

D_f :Représente la probabilité de recevoir un paquet du nœud voisin.
D_r :Représente la probabilité de recevoir un accusé de réception avec succès.

- **Taux de perte (PLR) :** est le rapport entre le nombre de paquets de données perdus et la somme de paquets livrés et le nombre de paquets perdus .

$$Tauxdeperte = \frac{Nombredepaquetsperdus}{Nombredepaquetsémis}$$

4.5 Evaluation selon différentes métriques de routage

Le simulateur Cooja comme étant une application fournit par un système d'exploitation offrant les droits de modification à leurs utilisateurs. IL autorise l'accès au code source écrit en langage C de certains fichiers.

Pour notre amélioration, on s'intéresse aux fichiers contenus dans le répertoire : Contiki/core/net/rpl/.

RPL utilise deux métriques qui sont prédéfinis dans le code, pour évaluer ces performances en modifiant à chaque fois les configurations dans le fichier rpl-conf.h, dans les codes de RPL aucune métrique est définie par défaut, ceci est indiqué par la configuration :

$$\#defineRPL_DAG_MCRPL_CONF_DAG_MC$$
$$\#else$$
$$\#defineRPL_DAG_MCRPL_DAG_MC_NONE$$
$$\#endif/*RPL_CONF_DAG_MC*/$$

- Pour évaluer la métrique ETX en remplaçant par la configuration :

$\#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_ETX$

- Pour évaluer la métrique d'énergie en remplaçant par la configuration :

$\#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_ENERGY$

MRHOF est la fonction objective utilisée par défaut de protocole RPL, son fonctionnement pose deux défis majeurs qui sont la qualité de service et la consommation d'énergie. Lorsque la métrique ETX est utilisée, le choix du parent préféré est fait sur la base de qualité de lien sans tenir compte du niveau d'énergie qui conduit à un épuisement énergétique rapide. Quand la métrique d'énergie est sélectionnée, le nœud choisi le parent le plus puisant qui dispose d'une grande capacité énergétique et sera comme parent préféré.

4.6 Amélioration proposée sur le protocole RPL :

Pour améliorer les performances de RPL, nous proposons de faire une combinaison additive de la métrique ETX et de métrique énergie afin d'optimiser la consommation énergétique ainsi que le taux de livraison de paquets dans le réseau.

• **Démonstration mathématique :**

La métrique résultante de l'approche combinatoire des deux métriques ETX et Energie s'écrit comme suit :

$$W = a_1 \times ETX + a_2 \times energy ...(1)$$

Les coefficients a_1 et $a_2$de ETX et d'énergie respectivement tels que :

$$0 < a_1 \text{ , } a_2 < 1 \text{ ... (2)}$$
$$\text{et}$$
$$a_1 + a_2 = 1 \text{ ... (3)}$$

Les deux métriques ETX et energy ne sont pas définies sur le même intervalle, tel que $ETX \subset [1; 512] et energy_2 \subset [0; 1]$, donc il est nécessaire de normaliser les deux métrique de telle sorte les deux intervalles se coïncident ,

Pour cela la métrique energy $_2$est définie comme suit :

$$Energy_2 = 1/energy ...(4)$$

avec : energy$\subset 1.935 \times 10^{-}3; 1$La métrique résultante de combinaison (1) devient :

$W = a_1 \times ETX + a_2 \times energy2$ ... (5)

L'équation est une combinaison linéaire convexe car les deux métriques appartiennent au même intervalle et $a_1 + a_2 = 1$.

Le choix des coefficients des deux métriques affecte énormément les performances de réseau, pour avoir un équilibre entre les métriques et faire un compromis entre l'efficacité-énergétique et le taux de livraison de paquets dans le réseau, le choix des ces coefficients sera porté sur la combinaison pondérée tel que : 50%ETX et 50%$energy_2$.

- **Implémentation de la solution :**

Tout d'abord, nous avons défini la nouvelle métrique dans le fichier rpl.h et l'ajouter dans le fichier rpl-conf.h :

$$\#define RPL_DAG_MC RPL_DAG_MC_EN_ETX$$

Et la grande partie de modification dans le fichier mrhof.c

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

#if RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_NONE
  return p->rank + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ETX
  return p->mc.obj.etx + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_ENERGY
  return p->mc.obj.energy.energy_est + (uint16_t)p->link_metric;
#elif RPL_DAG_MC == RPL_DAG_MC_EN_ETX
        metric2=p->1/(mc.obj.energy.energy_est);
        metric1=p->mc.obj.etx;
        metric=0.5*metric1+0.5*metric2;
        p->mc.obj.cout=metric;
        return metric+(uint16_t)p->link_metric;
#else
#error "Unsupported RPL_DAG_MC configured. See rpl.h."
#endif /* RPL_DAG_MC */
```

FIGURE 4.4 – Modification dans le fichier mrhof.c .

4.7 Premiére partie : l'évaluation en mode statique

Dans cette partie nous allons faire une évaluation de protocole RPL dans un réseau statique selon les scénarios suivants :

- Scénario 01 : évaluation du protocole RPL avec la métrique qualité de lien RPL(ETX)
- Scénario 02 : évaluation du protocole RPL avec la métrique énergie RPL(EN)
- Scénario 03 : évaluation du protocole RPL avec la solution proposée de son amélioration en termes de qualité de service RPL_QoS(ETX-EN)

• **Résultats et discussions :**

L'énergie est une ressource critique dans les réseaux LLN, la figure 4.5 présente la consommation d'énergie en fonction de la taille de réseau selon les déférentes métriques utilisées, on remarque que l'énergie consommée augmente lorsque le nombre de nœuds augmente, on peut y noter que, la nouvelle métrique ETX_EN permet de réduire la consommation d'énergie car les chemins préférés lors de la formation de DODAG sont plus optimisées en tenant compte de la qualité de lien et de la consommation énergétique, cela permet d'augmenter la durée de vie de réseau, par contre la métrique ETX sélectionne le parent préféré qui offre une meilleure qualité de lien sans tenir compte de son niveau d'énergie. Ainsi que, le choix de parent préféré par la métrique énergie se fait selon sa puissance énergétique seulement. Au regard des résultats obtenus, la métrique proposée ETX_EN permet d'améliorer les performances en consommation énergétique.

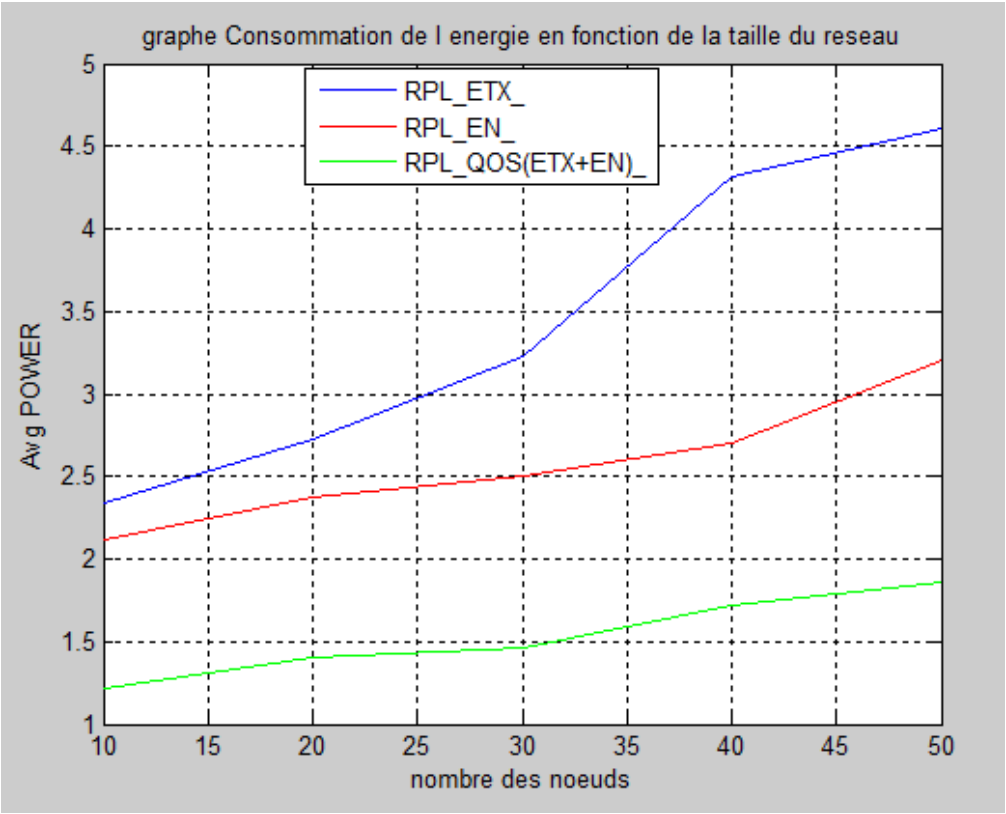


FIGURE 4.5 – L'énergie consommée par le réseau.

La figure 4.6 présente les performances des différentes métriques utilisées en termes de taux de livraison de paquets dans le réseau, on remarque que les résultats obtenus sont presque similaires entre les différentes métriques, tandis que la métrique ETX EN surpasse les autres métriques en termes de nombre de paquets livrés réussis.

• Lors d'utilisation de la métrique ETX seule entraine des problèmes de qualité de service, car les nœuds qu'ils offrent des meilleurs ETX vont y avoir plusieurs nœuds fils, vont donc constituer des goulots d'étranglement dans le réseau.

• Lorsque on utilise la métrique énergie n'offre pas de meilleur taux de livraison de paquets par rapport aux autres, car elle sélectionne le chemin optimal selon la capacité énergétiques sans se soucier de la fiabilité de lien de chemin.

• La métrique proposée ETX EN offre de meilleurs résultats, car elle fait le choix des chemins et la sélection des parents préférés en tenant compte du niveau d'énergie des nœuds et aussi de la qualité de lien, ce qui permet de faire un équilibrage de charge dans le réseau.

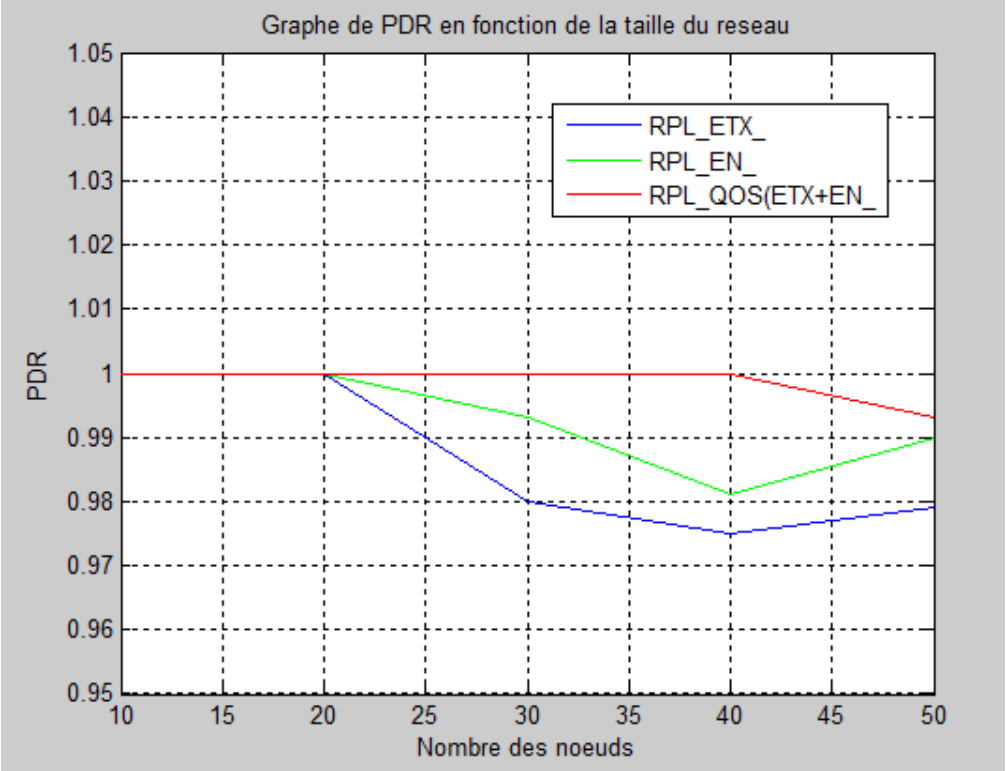


FIGURE 4.6 – Taux de réussite de paquets dans le réseau.

D'après la figure 4.7 dans l'intervalle [10 à 20] de nombre de nœuds dans le réseau, on remarque que le taux de perte de paquets est nul pour toutes les métriques de routage, tandis que lorsque le nombre de nœuds augmente le taux de perte augmente pour les métriques ETX et énergie, cela revient au nombre élevé des collisions des paquets lors des transmissions dans le réseau. D'autre part on remarque qu'avec l'amélioration RPL-QOS dans l'intervalle [10 à 40] le taux de perte de paquets est de l'ordre de 0% , ceci explique que l'amélioration minimise le nombre des collisions.

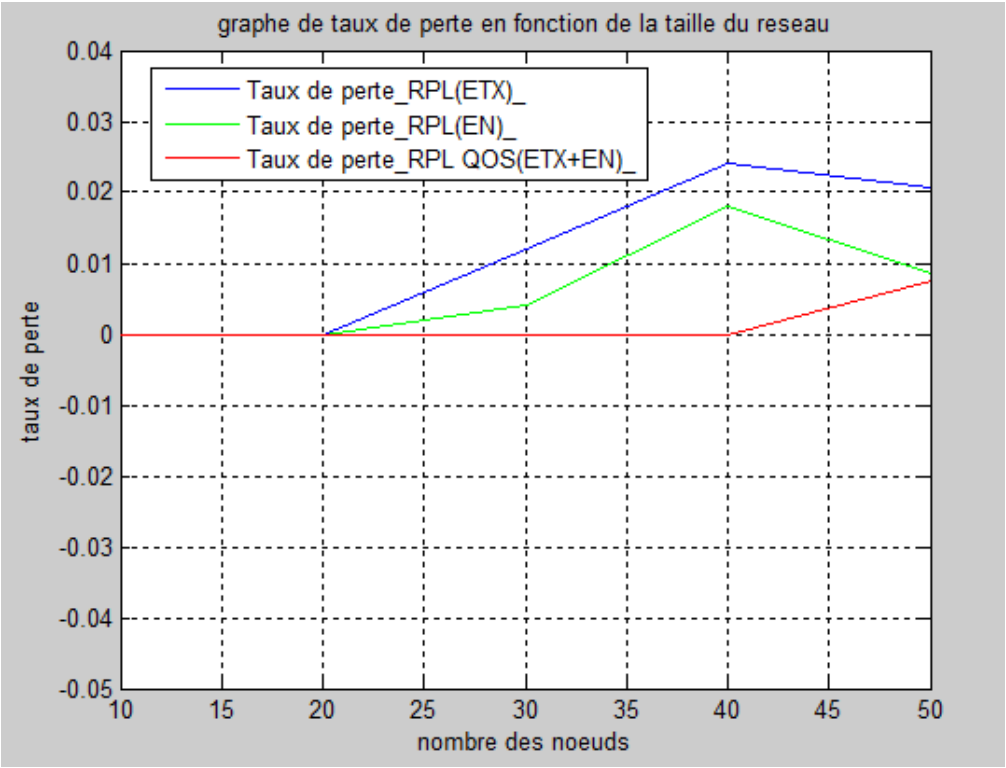


FIGURE 4.7 – Taux de perte de paquets dans le réseau.

4.8 Deuxième partie : l'évaluation en mode dynamique

Dans cette partie nous faisons une évaluation de protocole RPL avec le modèle de mobilité vu que notre étude s'intéresse à l'IoV, l'évaluation sera selon les scénarios suivants :

• Scénario 01 : évaluation du protocole RPL avec la métrique qualité de lien avec support de mobilité RPL_MOB(ETX).

• Scénario 02 : évaluation du protocole RPL avec la métrique énergie en intégrant le support de mobilité RPL_MOB(EN).

• Scénario 03 : évaluation du protocole RPL avec la solution proposée de son amélioration en termes de qualité de service dans un réseau dynamique RPL_QoS MOB(ETX-EN).

Pour la mobilité des nœuds, il est nécessaire d'ajouter l'extension mobilité dans le simulateur Cooja.

• **Etapes de configuration de mobilité :**

1-Téléchargement de plug-in : ce plugin de mobilité pour Cooja est disponible sur l'URL cidessous :

http://sourceforge.net/p/contikiprojects/code/HEAD/tree/sics.se/mobility/

2- Création d'un nouveau répertoire sur **contiki/outils/cooja/apps** et nommer-le mobility en déposant les fichiers téléchargés de dans.

3-Création de plug-in : Il peut y avoir un problème dans un fichier appelé "build.xml" au niveau du chemin :

"/home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobility" à la ligne 7 en disant que la construction ne peut pas trouver/construire le fichier cooja.jar et qu'il faut donc changer le chemin du chemin relatif au chemin absolu, et le mettre comme suit :

<propertyname="cooja_jar"value="/home/user/contiki/tools/cooja/dist/cooja.jar"/>

La mobilité des nœuds se fait selon une matrice qu'on trouve dans le fichier positions.dat.

build.xml

```
<?xml version="1.0"?>

<project name="COOJA Simulator" default="run" basedir=".">
  <property name="java" location="java"/>
  <property name="build" location="build"/>
  <property name="javadoc" location="javadoc"/>
  <property name="config" location="config"/>
  <property name="dist" location="dist"/>
  <property name="lib" location="lib"/>

<property name="cooja_jar" value="/home/user/contiki/tools/cooja/dist/cooja.jar"/>

  <target name="help">
    <echo>
The COOJA Simulator

  Start COOJA
  > ant run
  Build COOJA (dist/cooja.jar) and all default projects (MSPSim et al)
  > ant jar
```

```
user@instant-contiki: ~/contiki/tools/cooja/apps/mobility
File  Edit  View  Search  Terminal  Help
user@instant-contiki:~$ cd contiki/tools/cooja/apps/mobility
user@instant-contiki:~/contiki/tools/cooja/apps/mobility$ sudo ant jar
[sudo] password for user:
Buildfile: /home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobility/build.xml

check_jar:

init:

compile:
    [mkdir] Created dir: /home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobility/build
    [javac] /home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobility/build.xml:23: warning:
'includeantruntime' was not set, defaulting to build.sysclasspath=last; set to f
alse for repeatable builds
    [javac] Compiling 1 source file to /home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobil
ity/build

copy:

jar:
      [jar] Building jar: /home/user/contiki/tools/cooja/apps/mobility/lib/mobil
ity.jar

BUILD SUCCESSFUL
```

4-Activer le plug-in : de mobilité dans Cooja, et Démarrer Cooja Simulator :
cd contiki/outils/coojasudoantrun, Il est nécessaire d'ajouter les chemins du plugin :
[CONTIKI DIR]/tools/cooja/apps/mobility dans DEFAULT PROJECTDIRS et enregistrer les modifications.

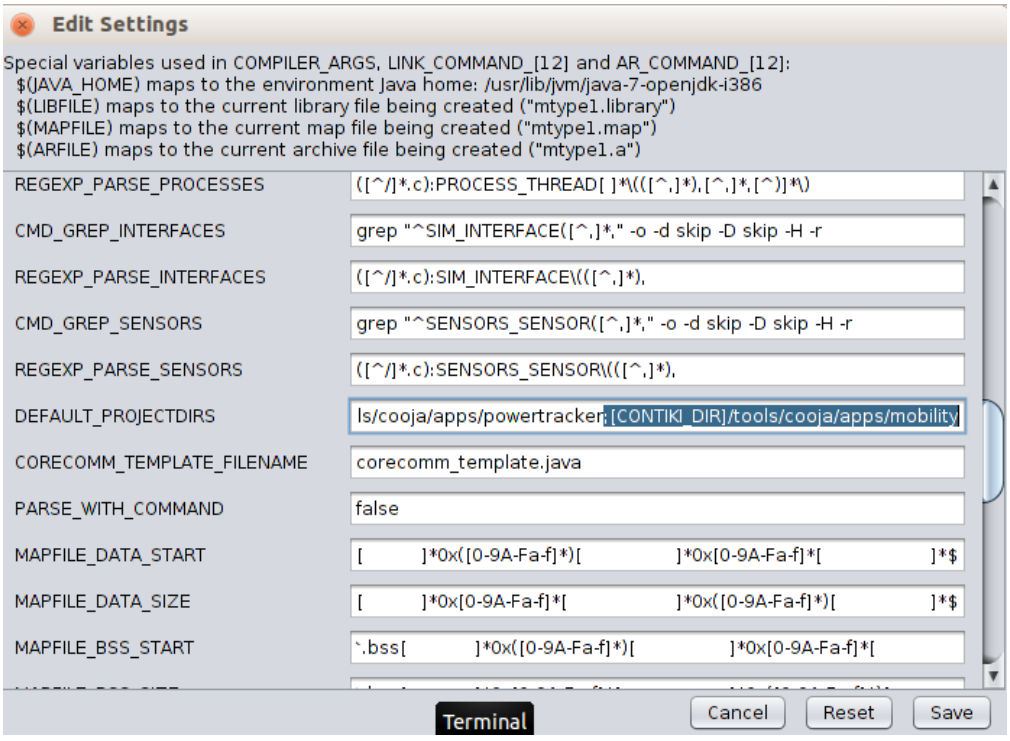


FIGURE 4.8 – Edit settings.

• **Résultats et discussions :**

Au cours des simulations, certains capteurs changent de parent préféré lorsque quelques nœuds sont mobiles, on constate que la fréquence de ce changement diffère d'un réseau à un autre. Ainsi, les métriques utilisées ont un impact sur la construction du DODAG et la modification de ses routes.

Après que tous les nœuds sont connectés au réseau mobile, on remarque que la consommation énergétique des nœuds mobiles est plus augmentée par rapport aux résultats obtenus précédemment ce qui signifie que la mobilité consomme plus d'énergie à cause des mouvements des nœuds.

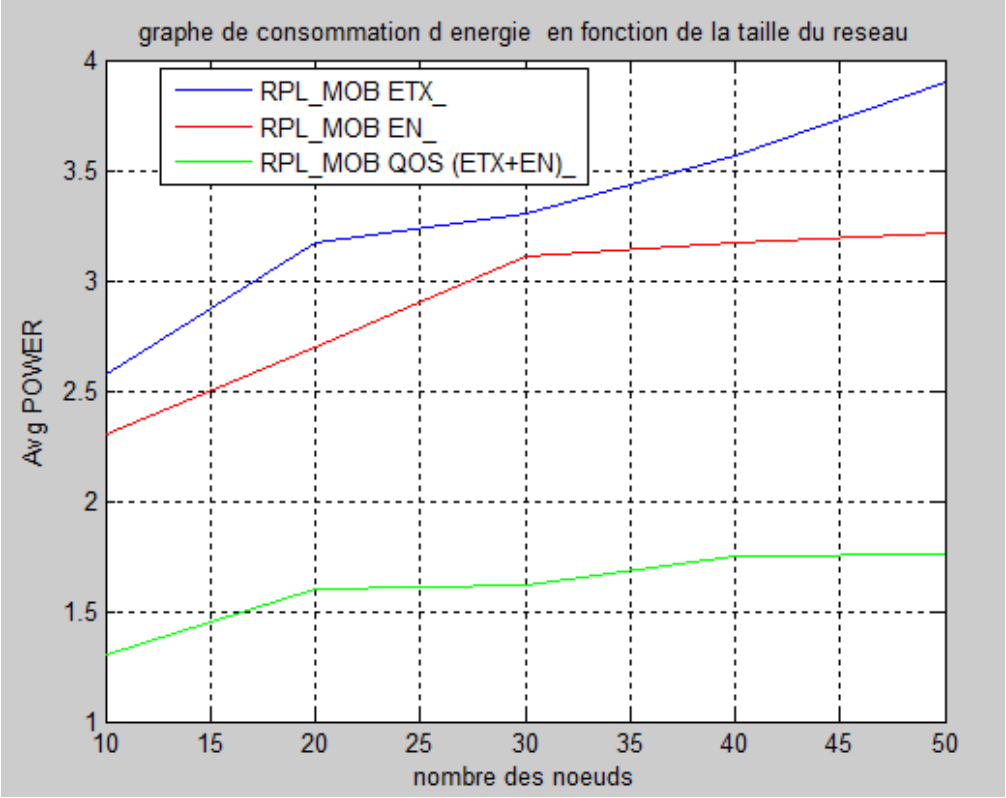


FIGURE 4.9 – l'énergie consommée avec la mobilité de réseau.

La figure 4.10 précédente représente le taux de livraison des paquets prenant en considération la mobilité des nœuds. À partir des résultats obtenus, on remarque que l'amélioration proposée surpasse les deux autres scénarios avec un taux de réussite plus élevé, ce qui montre que notre solution fonctionne même dans un réseau dynamique et améliore les performances de qualité de service du protocole RPL.

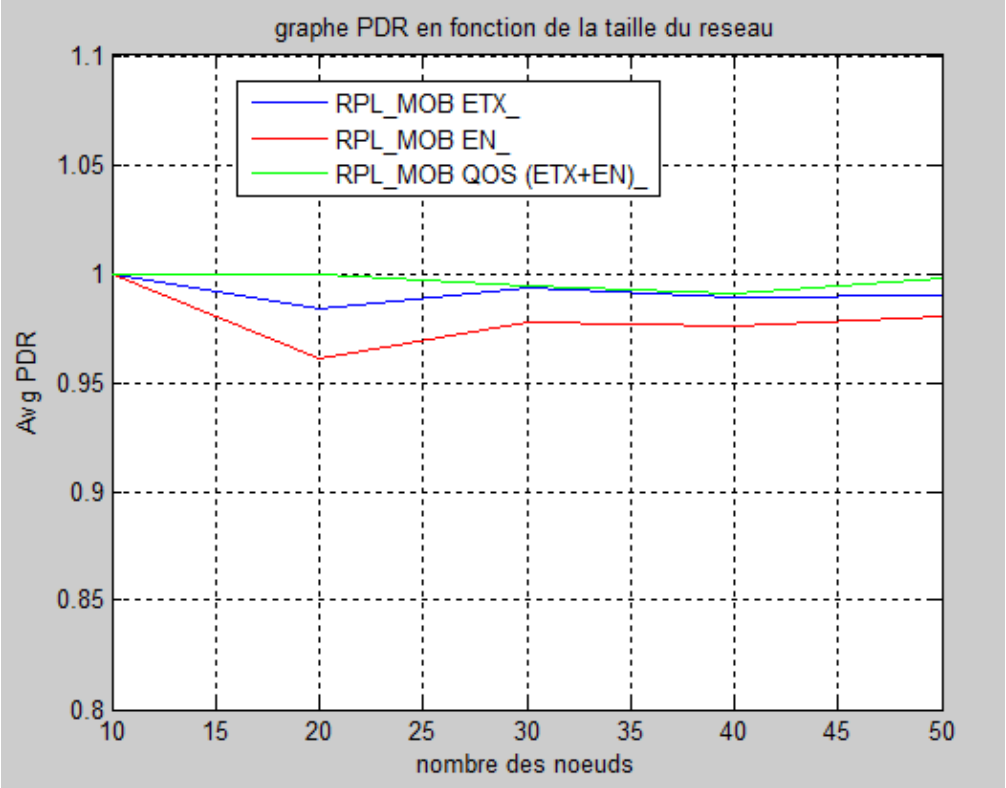


FIGURE 4.10 – Taux de livraison de paquets dans le réseau avec le support de mobilité.

D'après la figure 4.11, nous avons présenté l'évaluation de protocole RPL en termes de taux de perte des paquets dans le réseau, ou les nœuds sont mobiles. On remarque que pour le scénario RPL_QoS MOB(ETX-EN) est inférieur aux deux autres cela montre que l'amélioration proposée minimise les collisions dans un réseau dynamique.

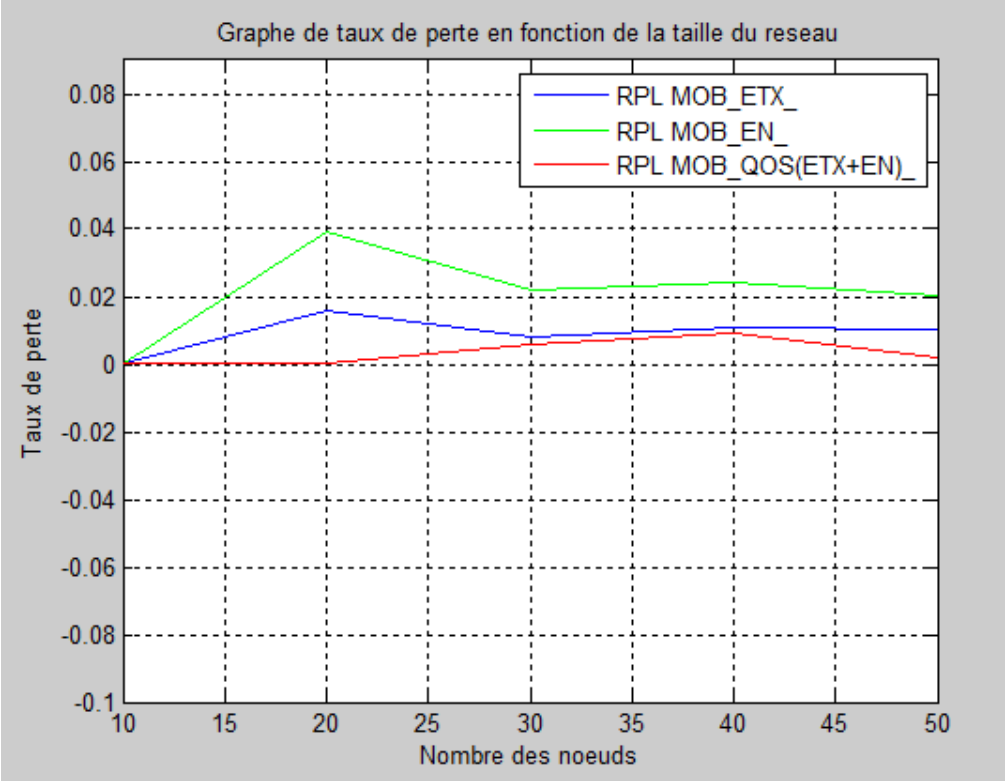


FIGURE 4.11 – Taux de perte de paquets avec le support de mobilité.

4.9 Troisième partie : comparisons et discussions

Dans cette partie nous évaluons les performances RPL en comparent entre les différents scénarios étudiés :

- scénario 01 : Evaluation de protocole RPL pour un réseau statique avec sa fonction objective Standard MRHOF sans aucune modification.
- scénario 02 : Evaluation d'amélioration proposée de qualité de service pour le protocole RPL dans un réseau statique (RPL-QoS).
- scénario 03 : Evaluation d'amélioration proposée de qualité de service pour le protocole RPL dans un réseau dynamique (avec des nœuds mobiles) (RPL-MOB-QoS).

On construit un graphe pour les métriques (énergie consommée et taux de réussite), qui représente les variations des valeurs des métriques en fonction du nombre des nœuds.

La figure 4.12 représente l'énergie moyenne consommée par le réseau en fonction de nombre des nœuds en comparent entre les trois scénarios étudiés : le premier l'implémentation initiale de protocole RPL, le deuxième avec une amélioration de qualité de service proposée, et le dernier RPL amélioré avec mobilité. On observe que l'énergie consommée augmente lorsque le nombre de nœud devient plus important, et le scénario RPL qui consomme le plus d'énergie puis RPL amélioré avec mobilité des nœuds (RPL-MOB-QoS), on constate que la mobilité consomme d'énergie car lorsque un nœud se déplace et change fréquemment de parent préféré donc il se connecte au réseau à chaque fois qu'il change de position.

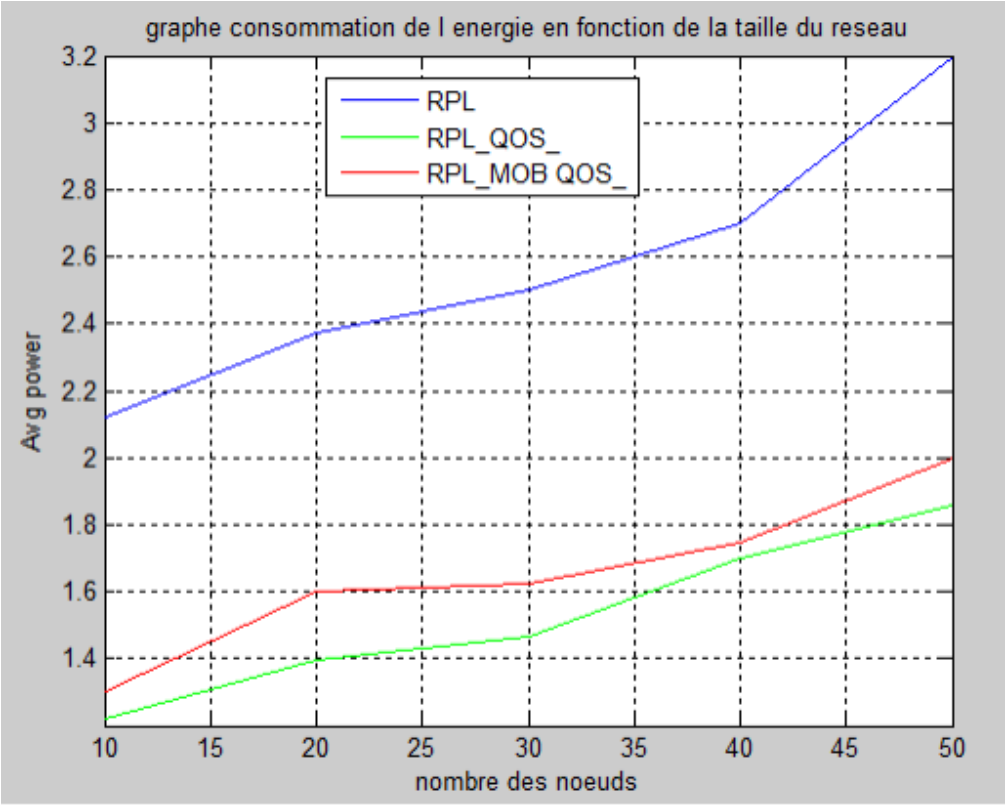


FIGURE 4.12 – Evaluation de l'énergie moyenne consommée par le réseau.

La topologie dynamique de réseau est définie par des nœuds qui changent fréquemment leurs positions, les nœuds communiquent entre eux à travers des liens radio symétrique, ou asymétrique, le changement d'emplacement change les routes entre les nœuds ce qui les obligent à trouver d'autres chemins pour maintenir la topologie. Cependant, cette fréquente rupture des liens a pour conséquence la non-fiabilité de chemin établit en termes de livraison de données, ceci est bien représenté dans la figure 4.13. On remarque que le PDR pour RPL amélioré sans mobilité est le meilleur.

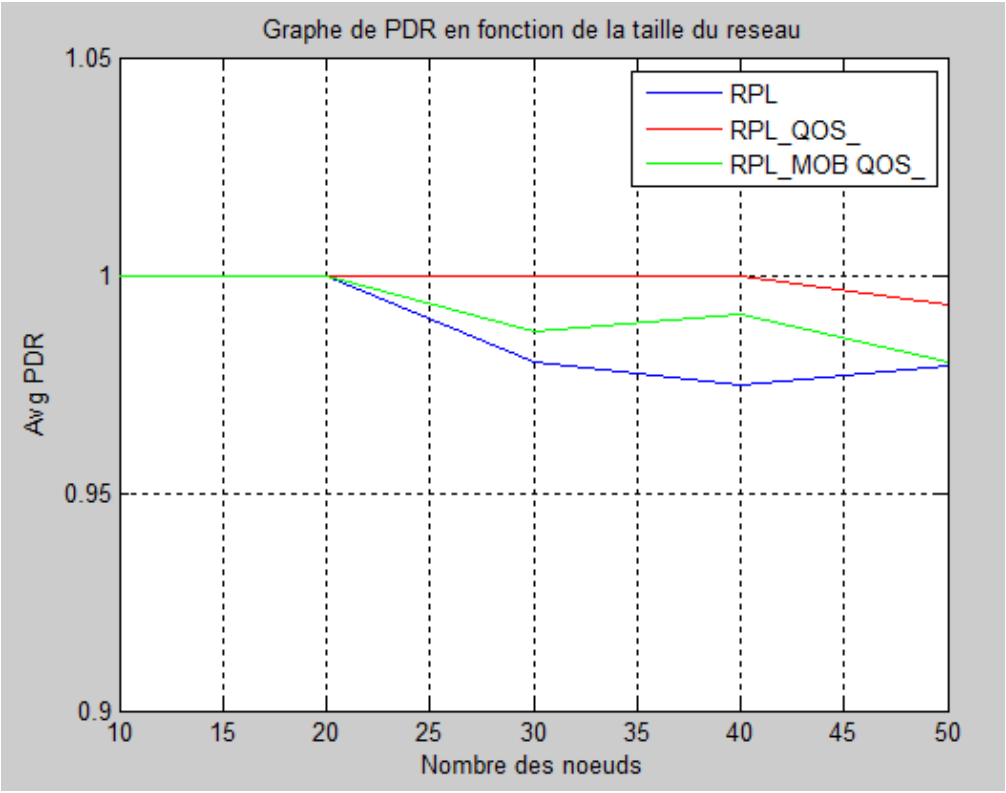


FIGURE 4.13 – Evaluation de taux de livraison de paquets dans le réseau.

La figure 4.14 affiche le taux de perte moyen de paquets pour tous les scénarios. Sur la base du nombre de nœuds dans le réseau, le taux de perte augmente lorsque la taille de réseau augmente, l'implémentation initiale de protocole RPL se caractérise par une perte de paquets majeure par rapport aux deux autres scénarios, ainsi on remarque que le scénario RPL_QOS_MOB est moins performant que le scénario RPL_QOS car avec la mobilité, les positions des nœuds capteurs et de nœud puit changent au fil du temps. Cela peut causer perte de connectivité lorsque les nœuds capteurs sont hors de portée de ses nœuds parents. Le nœud ne peut pas livrer les paquets au parent et les abandonne, ceci provoque la suppression et la perte des paquets.

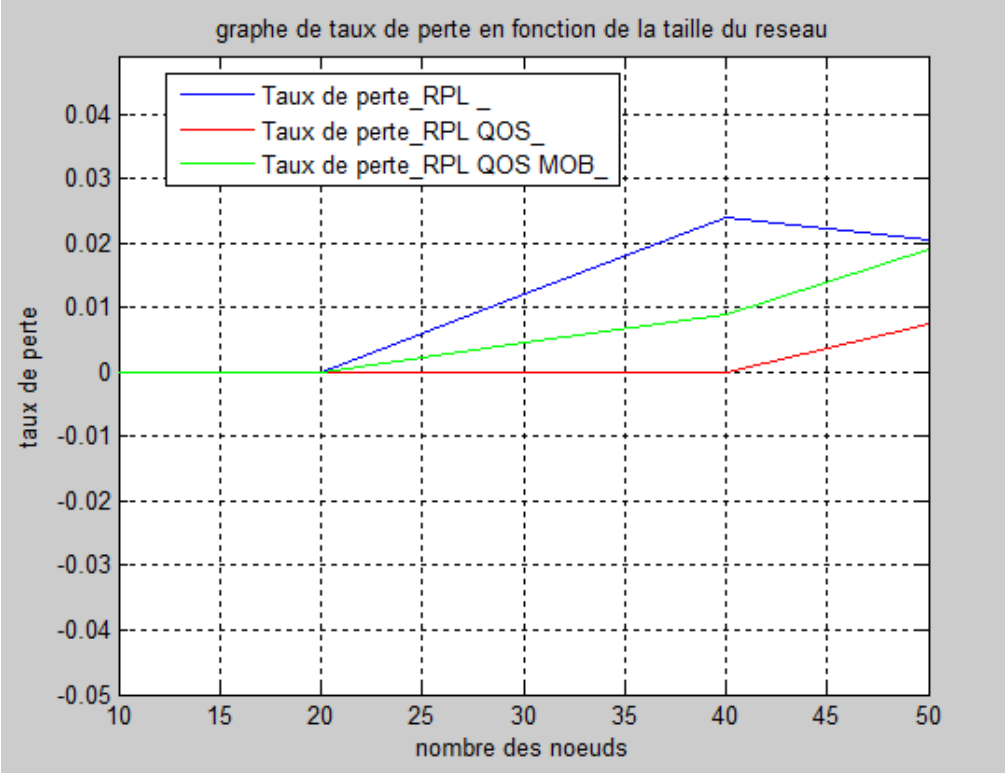


FIGURE 4.14 – Evaluation de taux de perte des paquets dans le réseau.

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances de protocole RPL d'après plusieurs scénarios et expériences qui présentent : les métrique étudiées, l'amélioration proposée et le support de mobilité.

Les résultats obtenus montrent une grande amélioration en termes d'énergie consommée, taux de paquets délivrés avec succès et la qualité de lien.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux LLN constituent un domaine de recherche très fertile, ont un large potentiel avec diverses applications. Cependant, il reste encore de nombreux défis qui doivent être abordés pour garantir un fonctionnement efficace de ces réseaux dans des applications réelles. Pour ce faire, plusieurs protocoles ont été proposés pour effectuer le routage des données dans les réseaux de capteurs sans fil, tel que le protocole RPL. Dans ce mémoire nous avons évaluer les performances des protocoles RPL en termes de qualité de service dans l'IoV, en étudiant la mobilité de réseau, les métriques de routage ETX et énergie, et certaines métriques de simulation : l'énergie et PDR. Les résultats obtenus avec l'émulateur Cooja ont été plus ou moins bons ce qui a nécessité de les améliorer, dans ce contexte, nous avons proposé d'améliorer les performances de protocole RPL en combinant les deux métriques de routage pour assurer la qualité de service dans un réseau dynamique, les résultats obtenus par conséquence étaient meilleurs en termes de consommation d'énergie, de taux de paquets délivrés avec succès. La réalisation de ce projet de fin d'étude nous a été très bénéfique où on a pu :

- Maitriser les différents outils du simulateur Cooja.
- Comprendre le fonctionnement de protocole de routage RPL.
- Avoir une idée sur les modèles de propagation radio et leurs fonctionnements.

En guise de perspective, il est nécessaire d'envisager une continuité sur ce thème de recherche et pour quoi pas l'exploration de nouvelles méthodes en prenant en considération la QoS dans les applications qui exigent la mobilité des nœuds dans un RCSF, afin de contribuer à améliorer plus les performances du protocole RPL pour le rend encore plus efficace.

Bibliographie

[1] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.

[2] Ian F Akyildiz and Mehmet Can Vuran. *Wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2010.

[3] Marica Amadeo, Claudia Campolo, and Antonella Molinaro. Priority-based content delivery in the internet of vehicles through named data networking. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 5 :17, 11 2016.

[4] Yacine Challal, Hatem Bettahar, and Abdelmadjid Bouabdallah. Les réseaux de capteurs (wsn : Wireless sensor networks). *Rapport interne, Université de Technologie de Compiègne, France*, 2008.

[5] Jian-Ming Chang, Ting-Yun Chi, Hsin-Yun Yang, and Han-Chieh Chao. The 6lowpan ad-hoc on demand distance vector routing with multi-path scheme. In *IET International Conference on Frontier Computing. Theory, Technologies and Applications*, pages 204–209, 2010.

[6] Yibo Chen, Jean-Pierre Chanet, Kun-Mean Hou, Hongling Shi, and Gil De Sousa. A scalable context-aware objective function (scaof) of routing protocol for agricultural low-power and lossy networks (rpal). *Sensors*, 15(8) :19507–19540, 2015.

[7] Fardin Derogarian. *Design of a Body Sensor Network Embedded in Textiles for Biomedical Applications*. PhD thesis, 04 2015.

[8] BENSLIMAN AZZEDDINE DJOUKLAFI IMED. L'adaptation d'un protocole iot dans une architecture iov. *Mémoire, Université Kasdi Merbah ,à Ouargla*, 2019.

[9] Olfa Gaddour, Anis Koubâa, Nouha Baccour, and Mohamed Abid. Of-fl : Qos-aware fuzzy logic objective function for the rpl routing protocol. In *2014 12th International symposium on modeling and optimization in mobile, ad hoc, and wireless networks (WiOpt)*, pages 365–372. IEEE, 2014.

[10] Wu He, Gongjun Yan, and Li Da Xu. Developing vehicular data cloud services in the iot environment. *IEEE transactions on industrial informatics*, 10(2) :1587–1595, 2014.

[11] Ching-Hsien Hsu, Sondès Kallel, Kun-Chan Lan, and Zibin Zheng. *Internet of Vehicles. Technologies and Services Toward Smart Cities : 6th International Conference, IOV 2019, Kaohsiung, Taiwan, November 18–21, 2019, Proceedings*, volume 11894. Springer Nature, 2020.

[12] Sibaram Khara Indu. Internet of vehicles (iov) : evolution, architectures, security issues and trust aspects. *Int J Recent Technol Eng (IJRTE)*, 7(6), 2019.

[13] M.K. Marina and S.R. Das. On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. In *Proceedings Ninth International Conference on Network Protocols. ICNP 2001*, pages 14–23, 2001.

[14] Yassine Meraihi. *Qualité de service dans les réseaux sans fil maillés/vanet*. PhD thesis, Université M'Hamed Bougara : Faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2016.

[15] Mr MA MESSAOUDI and Mr A BENZERBADJ. Optimisation du routage dans les réseaux llns.

[16] Reema Oamkumar. Qu'est-ce que l'internet des objets (iot) ?

[17] Tarcisio Bruno Oliveira, Pedro Henrique Gomes, Danielo G Gomes, and Bhaskar Krishnamachari. Alabamo : a load balancing model for rpl. In *Brazilian symposium on computer networks and distributed systems (SBRC)*, 2016.

[18] Bilel Romdhani. *Exploitation de l'hétérogénéité des réseaux de capteurs et d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2012.

[19] Somia Sahraoui. *Mécanismes de sécurité pour l'intégration des RCSFs à l'IoT (Internet of Things)*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2016.

[20] LAKHDARI Hamida LARIBI Salah. Conception et implémentation d'une nouvelle métrique de routage pour le protocole rpl pour l'amélioration de la qualité de service. 2017.

[21] Athmani Samir. *Protocole de sécurité pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des Sciences de l'Ingenieur, 2010.

[22] Paul Sanmartin, Aldo Rojas, Luis Fernandez, Karen Avila, Daladier Jabba, and Sebastian Valle. Sigma routing metric for rpl protocol. *Sensors*, 18(4) :1277, 2018.

[23] Ifeoma Helen Urama, Hossein Fotouhi, and Mohammad Mahmoud Abdellatif. Optimizing rpl objective function for mobile low-power wireless networks. In *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, volume 2, pages 678–683. IEEE, 2017.

[24] Jean-Philippe Vasseur, Mijeom Kim, Kris Pister, Nicolas Dejean, and Dominique Barthel. Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks. Technical report, 2012.