

Proposition d'une métrique de routage basée sur la mobilité pour le protocole RPL

Mohamed Montassar Sekma, Habib Youssef

PRINCE Research Unit, ISITCom, Hammam Sousse University of Sousse, Tunisia

sekmamontassar@gmail.com, habib.youssef@fsm.rnu.tn

Résumé—Pour offrir la qualité de service (QoS) dans un réseau de capteurs sans fil (RCSF) où les nœuds sont mobiles, les protocoles de routage doivent être capables de s'adapter à la modification continue de la topologie et à la rupture fréquente des liens radio. RPL est un protocole qui utilise des métriques de routage pour gérer la mobilité des nœuds tout en s'adaptant aux limitations des capteurs en termes d'énergie, stockage et capacité de calcul. Cependant, les métriques qu'utilise RPL ne garantissent pas dans un RCSF mobile des critères de performances tels que la consommation énergétique, la livraison de données avec succès, la sécurité, etc. Dans l'optique de gérer la mobilité des nœuds dans ce réseau tout en assurant la QoS dans les applications de collecte des données, nous avons défini une nouvelle métrique de routage basée sur la mobilité qui va être évalué par rapport aux métriques de routage définies dans ContikiOS.

Mots clés—RCSF mobile, RPL, métriques de routage, collecte des données, ContikiOS.

I. INTRODUCTION

Les capteurs sont des appareils équipés de fonctionnalités de détection avancées (surveiller la température, la pression, l'acoustique, etc.), d'un processeur de petite taille et d'un émetteur-récepteur sans fil à courte portée. Ils sont limités en énergie, mémoire et capacités de calcul. Un RCSF est un réseau avec un grand nombre de capteurs capables de récolter et de transmettre des données de manière autonome à un nœud de collecte de données qu'on nomme puits [1]. Ce réseau est généralement utilisé pour collecter des informations sur son environnement.

Pour répondre aux limitations des capteurs, des standards ont été spécialement conçus pour lui garantir la QoS tout en respectant ces exigences en énergie. Notre application utilise les standard IEEE 802.15.4 [2] et 6LoWPAN (IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks) [3]. Le premier définit la couche physique et la couche d'accès au médium (MAC), il est conçu pour les réseaux sans fil à bas débit. Le deuxième se base sur ce standard. Il a permis le routage des paquets IPv6 pour la participation d'objets très limités en énergie à l'Internet des objets. Ces deux standards ont permis l'adaptation aux RCSFs des protocoles ContikiMAC [4] et RPL (RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) [5].

Le premier protocole est un protocole d'accès au médium qui utilise la technique du duty-cycle. Cette technique consiste à ce que les capteurs utilisent des cycles de réveil et de sommeil. Dans ce protocole, l'émetteur répète la transmission d'un paquet jusqu'à la réception d'un message d'acquiescement ou durant toute sa période actif. Le deuxième protocole est un protocole qui permet de construire dans un RCSF, un graphe acyclique orienté et dirigé vers une destination qu'est le puits (DODAG: Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Dans ce graphe, les capteurs sont des nœuds ayant pour racine un puits, quant aux liens radio se sont des arcs. Dans ce graphe,

les routes sont construites en fonction d'une métrique de routage. Cette métrique va permettre aux capteurs de s'attribuer un rang correspondant à leur emplacement dans le DODAG. La métrique qu'on propose consiste à ce que le capteur s'attribue un rang en fonction de paramètres qui caractérisent ses déplacements dans le DODAG. C'est pour cette raison qu'on l'a nommé ARMN (Assigning a Rank to a Mobile Node: attribution d'un rang à un nœud mobile).

Dans notre application, les métriques de routage qu'on étudie sont qualité du lien, taux de transmission avec succès (ETX: Expected Transmission Count) et ARMN. Le protocole d'accès au médium ContikiMAC aura un impact sur ces métriques. De même, ces métriques auront un impact sur le routage. Ainsi, la topologie du DODAG sera obtenue à partir de métriques et de contraintes.

Diverses applications exigent la mobilité des nœuds tels que la surveillance d'animaux, la surveillance à l'aide de robots, la traque d'une cible, etc. La mobilité des nœuds a pour conséquence la fréquente rupture des liens radio, et peut augmenter le duty-cycle, temps de latence, la perte de paquets, etc. De ces faits, une étude comparative de l'impact des métriques de routage sur un RCSF mobile s'impose.

Cet article est structuré comme suit. La section 2 introduit les RCSF mobiles. La section 3 explique le fonctionnement du protocole ContikiMAC. La section 4 explique le fonctionnement du protocole RPL. La section 5 présente les fonctions objectives qui utilisent les métriques qualité du lien, ETX et ARMN. La section 6 présente des scénarios de simulation et analyse les résultats obtenus. La section 7 présente une conclusion avec des perspectives.

II. LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL MOBILES

A. La mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil

Dans un RCSF mobile [6], les nœuds sont embarqués dans des objets mobiles (soldat, voiture, animal, etc.). Ces nœuds mobiles sont autonomes et liés entre eux à travers des liaisons à base d'onde radio.

Les avantages d'un RCSF mobile :

- La mobilité permet la minimisation du trafic sur certains nœuds ou liaisons, ce qui a pour conséquence de minimiser la consommation d'énergie et d'étendre la durée de vie du réseau.
- La mobilité permet de minimiser les collisions et les pertes de données en minimisant les liaisons radio sur un nœud.

- La possibilité de minimiser une route entre un nœud source et un nœud destination en nombre de sauts, ce qui permet la minimisation du temps de latence et permet aussi de libérer certains nœuds de la gestion de la route.
- Les nœuds mobiles peuvent remplacer des nœuds en pannes.
- Les nœuds mobiles peuvent se déplacer d'une zone qui est sujette à des attaques de nœuds malveillants.
- Un nœud mobile peut connecter des nœuds qui ne sont pas à portée radio.
- Permet de couvrir une plus grande zone.

Les inconvénients d'un RCSF mobile :

- Les nœuds se déplacent d'une manière soit rapide, soit lente, soit aléatoire, soit contrôlée. Un nœud peut entrer et sortir du RCSF à tout moment, vu qu'il peut être hors de la portée radio des nœuds.
- La topologie dynamique est définie par des nœuds qui changent fréquemment de position. Ces derniers communiquent à travers des liens radio symétriques ou asymétriques. Le changement de la topologie change les routes entre les nœuds.
- La fréquente rupture de lien entre les nœuds a pour conséquence la non-fiabilité de la route établie entre les nœuds en termes de sécurité, livraison de données, l'interruption du trafic, la circulation inutile de messages, l'augmentation du temps de latence, la difficulté de localiser les nœuds qui changent de position, etc.

On peut conclure des avantages et des inconvénients d'un RCSF mobile qu'il est nécessaire d'avoir une bonne organisation entre les nœuds pour bien gérer la mobilité, ceci dépend de l'application. En effet, les avantages montrent que si les nœuds mobiles sont contrôlés (mouvement d'un robot, d'un soldat, etc.), cela est bénéfique, mais, les inconvénients montrent que si les nœuds se déplacent d'une manière aléatoire (mouvement des animaux, des voitures, etc.), ceci peut dégrader ou améliorer les performances du réseau.

B. Le modèle Random Waypoint

Random Waypoint (RWP) est un modèle de mobilité aléatoire des nœuds [7]. Dans ce modèle, un nœud choisit de se déplacer vers une destination aléatoire de coordonnées (x,y) avec une vitesse de déplacement aléatoire. Il prend un temps d'attente aléatoire à son arrivé à la destination. Puis recommence. Ce modèle est souvent utilisé pour l'évaluation des performances des protocoles de routage. C'est pour cette raison qu'on va l'utiliser dans notre application.

III. LE FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE CONTIKIMAC

Le protocole ContikiMAC est un protocole qui utilise la technique du duty-cycle de manière asynchrone, ce qui revient à dire qu'il n'y a pas de synchronisation entre la période de réveil et la période de sommeil. Son fonctionnement est comme suit :

- Côté émetteur : Dans une transmission unicast, l'émetteur répète la transmission d'un paquet jusqu'à la

réception d'un message d'acquittement (ACK). Dans une transmission broadcast, l'émetteur répète la transmission d'un paquet durant toute sa période de réveil.

- Côté récepteur : Le récepteur allume sa radio et vérifie l'état du canal par deux tests d'occupation du médium (CCA : Clear Channel Assessment), s'il détecte une transmission de paquets, il écoute le canal. En cas de réception d'un paquet, le récepteur émet un message d'acquittement à l'émetteur.

IV. LE FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE RPL

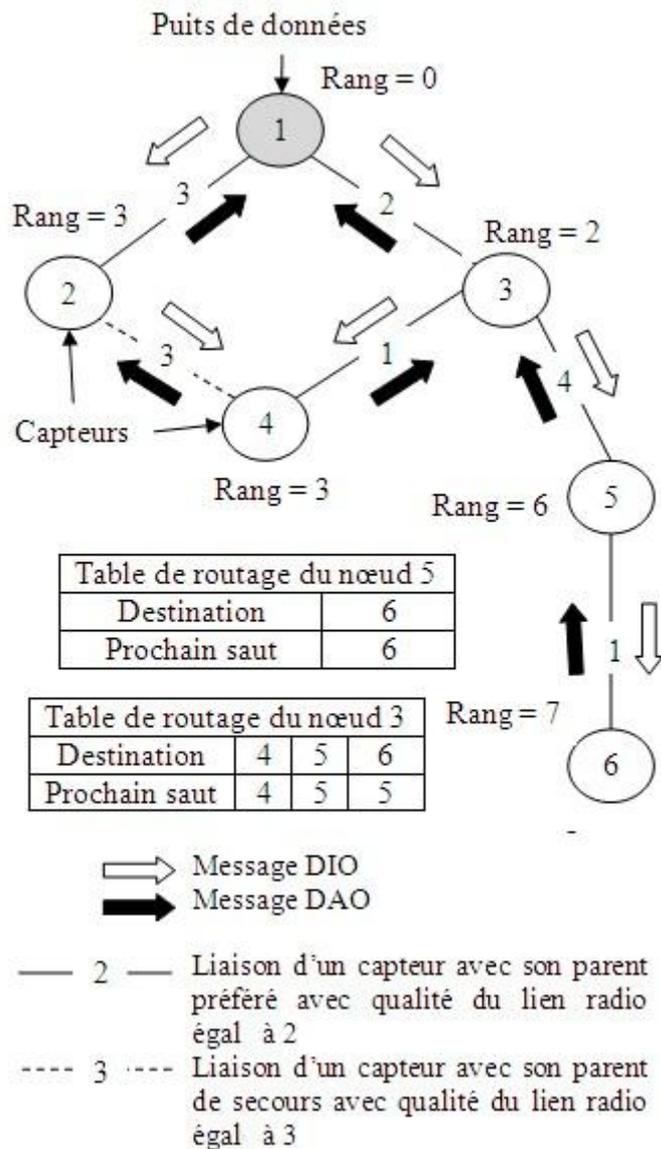


Fig. 1 Fonctionnement du protocole RPL en mode de stockage avec la qualité du lien radio comme métrique de routage

Le protocole RPL construit dans un RCSF, un graphe acyclique orienté et dirigé vers une destination qu'est le puits (DODAG : Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Il crée ainsi un arbre de routage ayant pour racine le puits. Les routes dans cet arbre sont construites en fonction d'une métrique de routage qui permet aux nœuds de s'attribuer un rang correspondant à leur emplacement dans le DODAG. De ce fait, le puits doit toujours s'attribuer le plus petit rang pour que les capteurs incrémentent leur rang en descendant dans le DODAG. La construction de cet arbre se fait à travers quatre messages ICMPv6 qui sont DIO (DODAG Information Object),

DIS (DODAG Information Solicitation), DAO (Destination Advertisement Object), DAO_ACK (Destination Advertisement Object Acknowledgement).

Pour construire un DODAG selon une métrique bien déterminée (énergie, nombre de saut, ETX, etc.). Le puits diffuse périodiquement un message DIO aux capteurs à sa portée radio. Ce message contient des informations telles que le rang de l'émetteur et la fonction objective à utiliser. Cette fonction est conçue en fonction d'une métrique de routage. Un capteur qui reçoit un message DIO, calcule son rang en additionnant le rang de son parent au coût de la métrique. Ensuite, il diffuse ce message à ces voisins. Le message DIO peut être sollicité par un message DIS. Le capteur ajoute à sa liste des parents, les nœuds avec qui il a eu les plus petits rangs. Le parent préféré est celui avec qui il a eu le plus petit rang. Il signale ses choix à ses parents par un message DAO. Ce message peut être acquitté par un message DAO_ACK.

Pour maintenir les routes du DODAG, le protocole RPL utilise l'algorithme de Trickle qui consiste à ce que les capteurs doublent la période d'attente d'envoi des messages DIO dans le cas de la réception d'un message DIO n'indiquant pas un changement de la topologie. Dans le cas contraire, les capteurs vont réinitialiser la période à sa plus petite valeur.

Dans notre application, pour la construction de routes entre nœuds dans le DODAG, RPL fonctionne en mode de stockage (storing mode). Dans ce mode, chaque capteur signale à son parent, ses descendants par des messages DAO. Ainsi, chaque parent sauvegarde dans sa table de routage, ses descendants et le prochain saut pour les atteindre. De ce fait, la table contiendra les champs destination et prochain saut. Si la source trouve la destination dans sa table de routage, elle lui émet ses données. Sinon, elle émet ses données à son parent préféré. Ces données seront soit livrées par ce dernier, si la destination se trouve dans sa table de routage, soit livrer d'un parent à un autre jusqu'à un qui connaît une route vers la destination. Le puits et les nœuds feuilles ne gèrent pas de table de routage, ils émettent leurs données aux nœuds intermédiaires afin de les router.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du protocole RPL, on va décrire la construction du DODAG de la figure 1. En premier temps, chaque capteur attribue une note à la qualité du lien radio qu'il a avec le nœud qu'il lui a transmis un message DIO. Il attribue des notes de 1 à 9 aux liens radio. Il attribue 1 à la meilleure qualité et 9 à la plus mauvaise qualité. Puis, il calcule son rang en additionnant le rang du nœud émetteur à la qualité du lien radio entre eux. En deuxième temps, chaque capteur signale ses choix de parent préféré et de parent de secours par des messages DAO.

Dans notre application, pour qu'un capteur joigne le DODAG, il faut qu'il réussisse à livrer des données. Cette contrainte est faite pour que seuls les capteurs actifs participent au routage des données et pour résoudre certains problèmes de mobilité des nœuds.

V. LES FONCTIONS OBJECTIVES

A. La fonction objective OF0

La fonction objective OF0 est conçue selon la métrique qualité du lien radio et des contraintes [8]. Lorsque RPL utilise cette métrique, chaque capteur calcule son rang selon l'équation suivante :

$$R(N) = R(P) + \text{Incrémentation ;}$$

avec

$$\text{Incrémentation} = (R_f * S_p + S_r) * \text{MinHopRankIncrease}$$

Tels que :

- R(N) : Le rang du capteur.
- R(P) : Le rang du parent du capteur.
- S_p : step_of_rank : Généralement, une constante qui correspond à la qualité du lien radio utilisée dans le réseau. Elle a une valeur entre 1 et 9.
- S_r : stretch_of_rank : Une constante qui augmente la valeur de S_p pour permettre la sélection d'un potentiel parent de secours.
- R_f : Un facteur utilisé pour augmenter la valeur de S_p.
- MinHopRankIncrease : La valeur minimal pour incrémenter un rang. Elle est égale à 256.

Le rang d'un capteur est la somme de son rang et le rang de son parent préféré. Ainsi, pour choisir son parent préféré, le capteur sélectionne le voisin qui lui permet de router des paquets jusqu'au puits sur le chemin avec le plus petit coût. Le coût du chemin est la somme des incréments.

B. La fonction objective MRHOF

La métrique ETX permet à un nœud de déterminer le taux de transmission avec succès [8]. Le protocole ContikiMAC a un impact sur cette métrique. La fonction objective MRHOF est conçue selon cette métrique et des contraintes. Lorsque RPL utilise cette métrique, chaque capteur calcule le ETX qu'il a sur le lien radio qu'il partage avec son voisin, comme suit :

$$ETX_L = \frac{1}{d_f \times d_r}$$

Tels que :

- ETX_L : Le nombre moyen de transmissions pour la réception d'un paquet sur un lien L.
- d_f : La probabilité qu'un paquet soit reçu par la destination.
- d_r : La probabilité qu'un acquittement soit envoyé de la destination.

Le rang d'un capteur est la somme de son rang et le rang de son parent préféré. Ainsi, pour choisir son parent préféré, le capteur sélectionne le voisin qui lui permet de router des paquets jusqu'au puits sur le chemin avec le plus petit coût. Le coût du chemin est la somme des ETX_L.

C. La fonction objective ARMNOF

La fonction objective ARMNOF est conçue selon la métrique ARMN qu'est définie par des paramètres qui définissent un nœud mobile. Ces paramètres sont déterminés par les messages DIO reçus :

- Nature du parent du capteur : Ce paramètre sert à ce que les capteurs s'attribuent un rang petit s'ils ont pour parent le puits. Il sert aussi à solliciter les capteurs mobiles à choisir comme parent préféré le puits et les voisins de ce dernier.
- Nombre de message DIO reçus : Ce paramètre sert à ce qu'un trafic soit raisonnable sur un capteur. En effet, si le capteur reçoit plusieurs messages DIO, ceci signifie qu'il est possible qu'il va recevoir plusieurs messages DAO, d'où la possibilité d'être le parent préféré de plusieurs capteurs.

Dans un RCSF mobile, les contraintes qui peuvent être coûteuses en énergie pour un capteur mobile lors de son déplacement sont :

- Une route à plusieurs sauts à destination le puits. La fonction ARMNOF permet aux capteurs de choisir les routes les plus courtes par l'attribution d'incrémentations de rang selon des priorités destinés à ce que les capteurs sans énorme charge de trafic et s'approchant le plus du puits soient sélectionnés comme parent préféré.
- Un trafic énorme dû au rôle de parent préféré de plusieurs capteurs. La fonction ARMNOF permet de réduire ce trafic par la détermination du nombre de messages DIO.

Lorsque RPL utilise la fonction objective ARMNOF, chaque capteur calcule son rang selon l'équation suivante :

$$R(N) = R(P) + \text{Incrémentation 1} + \text{Incrémentation 2}$$

Tels que :

- R(N) : Le rang du capteur.
- R(P) : Le rang du parent du capteur.
- Incrémentation 1 : Voir tableau 1.
- Incrémentation 2 : Voir tableau 1.

TABLEAU I

LES PARAMETRES DE LA FONCTION OBJECTIVE ARMNOF

		Valeur
Incrémentation 1 : Nature du parent du capteur	Puits	1000
	Capteur	2000
Incrémentation 2 : Nombre de message DIO reçus	Entre 0 et 25	3000
	Entre 25 et 50	4000

Les remarques sur le tableau 1 :

- L'ordre des valeurs prédéfinies est important. En effet, la valeur de chaque paramètre de notre fonction objective ARMNOF, défini sa priorité
- Un compteur compte le nombre de messages DIO reçu jusqu'à 50. Lorsque ce nombre dépasse 50, le compteur recommence le compte. Cette contrainte est faite pour que le trafic soit raisonnable sur un capteur.

Le rang d'un capteur est la somme de son rang et le rang de son parent préféré. Ainsi, pour choisir son parent préféré, le capteur sélectionne le voisin qui lui permet de router des paquets jusqu'au puits sur le chemin avec le plus petit coût. Le coût du chemin est la somme des incréments.

VI. SIMULATION ET ANALYSE

D. Les scénarios de simulation

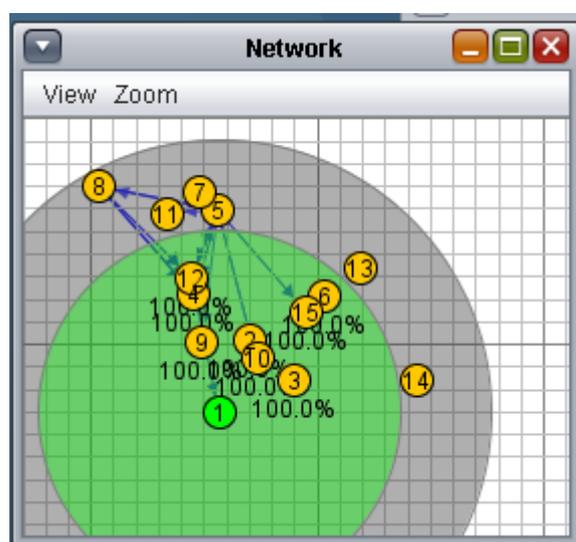


Fig. 6 Topologie du RCSF

ContikiOS [9, 10] est un système d'exploitation conçu spécialement pour les RCSFs. Il fournit le simulateur Cooja (Contiki OS Java Simulator) qui permet de simuler les RCSF.

Nous avons utilisé ce simulateur pour l'évaluation de scénarios qui évaluent l'impact des métriques de routage sur un RCSF mobile. La figure 2 représente la topologie du RCSF étudié. La zone verte représente la zone de réception du puits, et la zone grise représente sa zone d'interférence. L'arrière-plan est une grille carrée de coordonnées X et Y qui permet de déterminer les positions des nœuds. Chaque carré a une longueur égale à 10 mètres.

TABLEAU II
LES PARAMETRES DE LA SIMULATION DU RCSF

Paramètres	Valeur
ContikiOS	Contiki-2.7
Protocole de transport	UDP
Protocole de routage	RPL fonctionnant en mode de stockage
Protocole de la couche adaptation	6LoWPAN
Protocole MAC	CSMA
Mécanisme duty-cycle	ContikiMAC
Standard des couches physique et MAC	IEEE 802.15.4
Topologie	DODAG
Les nœuds	Un puits et 14 capteurs
La portée radio de chaque nœud	80 mètres
Modèle de mobilité des nœuds	RWP
La durée de la simulation	6 minutes
Le temps d'attente minimal du nœud avant l'envoi d'un message DIO	4.096 secondes
Le temps d'attente maximal du nœud avant l'envoi d'un message DIO	1048.576 secondes
Le temps d'attente du capteur avant l'envoi des données	20 secondes

TABLEAU III
PARAMETRES DU MODELE DE MOBILITE RWP

Paramètre	Valeur
Destination	Un point de coordonnées x et y correspondant à une distance entre 0 et 150 mètres
Vitesse (un mètre par seconde)	Une valeur entre 1 et 4
Temps d'attente (secondes)	Une valeur entre 2 et 10

Pour montrer l'impact des fonctions objectives sur un RCSF mobile, nous avons simulé un réseau décrit selon les paramètres d'entrée du tableau 2. Les paramètres du modèle de mobilité RWP sont décrits dans le tableau 3. Dans ce modèle, les nœuds vont se déplacer de manière aléatoire. Dans chacun des scénarios de simulation étudiée, ce déplacement des nœuds va être le même. En effet, le but de cet article est de déterminer l'impact des métriques de routage sur un même RCSF mobile.

E. Les métriques d'évaluation de la QoS du RCSF

Les métriques d'évaluation de la QoS du RCSF étudié dans chacun de nos scénarios sont :

- Nombre de capteurs ayant joint le DODAG.
- Temps pour que tous les capteurs du RCSF joignent le DODAG.
- La moyenne des énergies consommées des capteurs qui se calcule comme suit :

$$\text{AvgPower} = \frac{\text{SumPower}}{\text{NbMotesInDODAG}}$$

Tels que :

- AvgPower : La moyenne des énergies consommées des capteurs.
- SumPower : Somme des énergies consommées des capteurs.
- NbMotesInDODAG : Nombre de capteurs joignant le DODAG.
- Le duty-cycle est le cycle où le capteur se met entre les modes sommeil et actif. Lorsque ce dernier est en mode actif, il se décompose en périodes d'écoute et de transmission. Les moyennes des périodes d'écoute et de transmission dans ce RCSF se calculent comme suit :

$$\text{AvgListenDutyCycle} = \frac{\text{SumListenDutyCycle}}{\text{NbMotesInDODAG}}$$

Tels que :

- AvgListenDutyCycle : La moyenne des périodes d'écoute des capteurs.
- SumListenDutyCycle : Somme des périodes d'écoute des capteurs.
- NbMotesInDODAG : Nombre de capteurs joignant le DODAG.

$$\text{AvgTransmitDutyCycle} = \frac{\text{SumTransmitDutyCycle}}{\text{NbMotesInDODAG}}$$

Tels que :

- AvgTransmitDutyCycle : La moyenne des périodes de transmission des capteurs.
- SumTransmitDutyCycle : Somme des périodes de transmission des capteurs.
- NbMotesInDODAG : Nombre de capteurs joignant le DODAG.
- Les paquets étudiés sont les paquets UDP contenant les données, et les paquets ICMPv6 qui sont les messages DIO, DAO et DIS. La moyenne de chacun de ces paquets se calcule selon l'équation ci-dessous à l'exception des DIO où on prend en considération le nombre de puits qui participent à leur diffusion :

$$\text{AvgPacket} = \frac{\text{SumPacket}}{\text{NbMotesInDODAG}}$$

Tels que :

- AvgPacket : La moyenne des paquets des capteurs.
- SumPacket : Somme des paquets des capteurs.
- NbMotesInDODAG : Nombre de capteurs joignant le DODAG.

F. Analyse des résultats

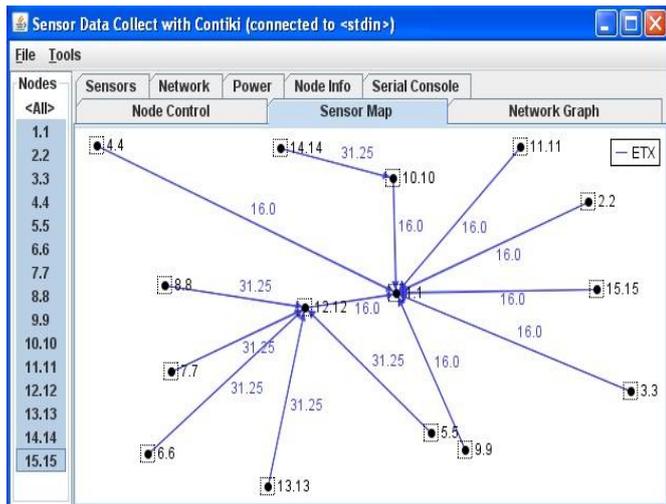


Fig. 3 DODAG du scénario 3

Au cours des simulations, on note que la mobilité des nœuds est responsable que certains capteurs changent de parent préféré dans les RCSF utilisant les fonctions objectives MRHOF, OF0 et ARMNOF, (voir figure 3). On constate aussi que la fréquence de ce changement diffère d'un réseau à un autre. Ainsi, les fonctions objectives ont un impact sur la construction du DODAG et la modification de ses routes.

TABLEAU IV

LES PARAMETRES D'ÉVALUATION DE LA CONSTRUCTION DU DODAG SELON CHAQUE FONCTION OBJECTIVE

Scénario	Nombre de capteurs ayant joint le DODAG	Temps pour que tous les capteurs du RCSF joignent le DODAG
MRHOF	14	1 min 33 sec
OF0	14	1 min 26 sec
ARMNOF	14	1 min 24 sec

A la fin de la simulation, on constate du tableau 4 que :

- Dans notre application, pour qu'un capteur joigne le DODAG, il faut qu'il réussisse à livrer des paquets UDP. Cette contrainte est faite pour que seuls les capteurs actifs participent au routage des données et pour résoudre certains problèmes de mobilité du puits.
- On remarque que le temps pour que tous les capteurs du RCSF joignent le DODAG est presque le même. La raison est que le déplacement des nœuds n'a pas conduit à la sortie de capteurs hors de la zone de couverture du réseau.

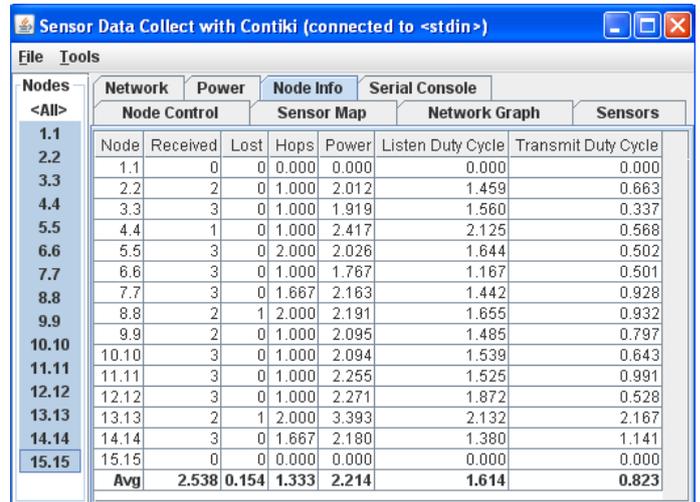


Fig. 4 Résultats obtenus qui évaluent la QoS du RCSF à un instant donné

Au cours de la simulation, on a obtenu des résultats qui permettent d'évaluer l'impact des métriques de routage sur les RCSF mobiles (voir figure 4). De ces résultats, on a tracé les courbes suivantes :

Variation de la moyenne des énergies consommées des capteurs selon la fonction objective

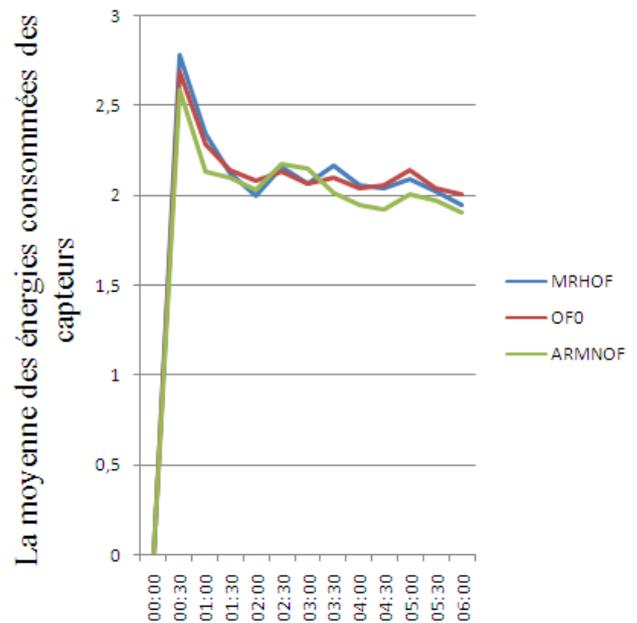


Fig. 5 Variation de la moyenne des énergies consommées des capteurs selon la fonction objective

Variation de la moyenne des périodes d'écoute des capteurs selon la fonction objective

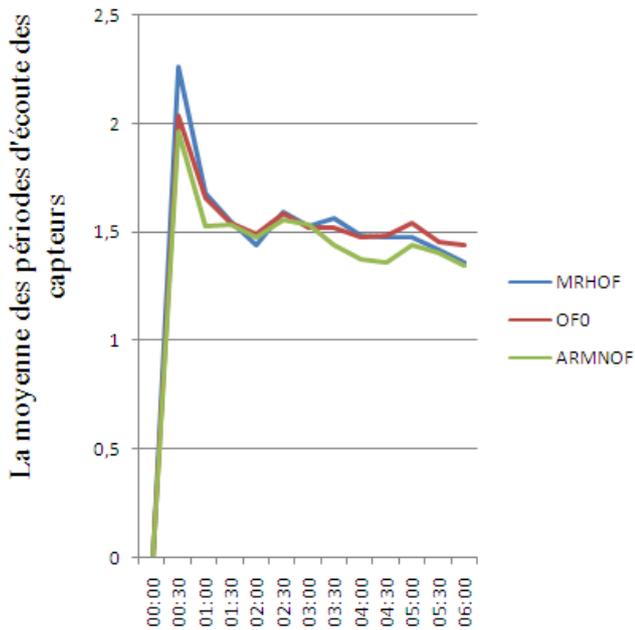


Fig. 6 Variation de la moyenne des périodes d'écoute des capteurs selon la fonction objective

Variation de la moyenne des périodes de transmission des capteurs selon la fonction objective

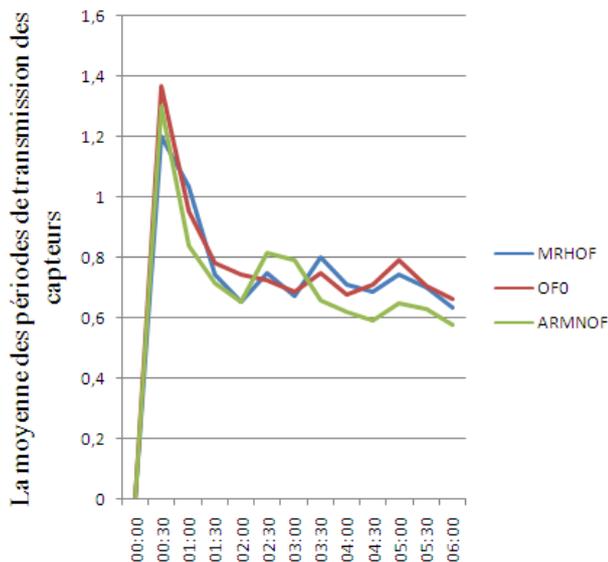


Fig. 7 Variation de la moyenne des périodes de transmission des capteurs selon la fonction objective

Les figures 5, 6 et 7 représentent la variation à travers le temps de la moyenne des énergies consommées, des périodes d'écoute et de transmission des capteurs selon la fonction objective. Ce qu'on constate est que :

- Les variations des courbes dans ces trois figures sont presque semblables. L'explication est qu'une grande consommation de l'énergie de la part des capteurs, implique de grandes périodes d'écoute et de transmission, ce qui implique un grand trafic de paquets.

- Dans la première minute, il y a une augmentation importante de l'énergie consommée qui s'explique par la connexion des nœuds au RCSF.
- Après que tous les nœuds se soient connectés au RCSF, on constate que la consommation énergétique des capteurs change au cours du temps. Des fois, un RCSF utilisant la fonction MRHOF consomme moins qu'un RCSF utilisant la fonction objective OF0. D'autres fois, le contraire est vrai. L'explication est que l'équation de calcul de la moyenne des énergies consommées des capteurs dépend de la consommation énergétique de chaque capteur. Ainsi, si certains capteurs ont une grande consommation d'énergie alors la moyenne augmente. Un capteur est gourmand en énergie généralement lorsqu'il gère un énorme trafic. La fonction objective ARMNOF prend en considération le trafic, ce qui explique le fait qu'elle a été moins gourmande durant une majeure partie de la simulation. La période où la consommation d'énergie du réseau utilisant cette fonction était grande, c'est lorsqu'un nœud s'est trouvé à être le seul choix de parent préféré de plusieurs capteurs (voir figure 3).

TABLEAU V

LA MOYENNE DES PAQUETS DE DONNEES SELON LA FONCTION OBJECTIVE UTILISEE PAR LE RCSF

Fonction objective	Paquet UDP	
	Moyenne des paquets de données reçus	Moyenne des paquets de données perdus
MRHOF	10,786	5,214
OF0	9,786	4,643
ARMNOF	10,929	4,857

TABLEAU VI

LA MOYENNE DES PAQUETS ICMPV6 SELON LA FONCTION OBJECTIVE UTILISEE PAR LE RCSF

Fonction objective	Paquet ICMPv6		
	Moyenne des paquets DIO	Moyenne des paquets DAO	Moyenne des paquets DIS
MRHOF	112,533	74,785	8
OF0	84,6	39,5	8
ARMNOF	107,6	49,071	8

A la fin de la simulation, on constate des tableaux 4 et 5 qui indiquent la moyenne des paquets dans chaque scénario que :

- L'avantage d'un RCSF utilisant la fonction MRHOF s'est que les capteurs favorisent les liens radio offrant la fiabilité. Cependant, un capteur peut avoir pour seul choix un lien radio qui ne garantit pas cette fiabilité, ce qui va rendre tout un chemin vers le puits non fiable. Cette situation est très fréquente dans un RCSF mobile. Ceci explique les résultats obtenus du nombre de paquets de données reçus et perdus.
- Un RCSF mobile utilisant la fonction OF0 ne prend pas en considération que l'incrémentation du rang des nœuds, ce qui va réduire les parties communicantes dans

le réseau, d'où l'échange des données. Ceci explique les résultats obtenus du nombre de paquets de données reçus et perdus.

- Un RCSF mobile utilisant la fonction ARMNOF prend en considération le trafic. En effet, la charge de trafic d'un nœud ne doit être ni trop grande, ni trop petite. En effet, si elle est petite, les parties communicantes dans le réseau seront réduites, d'où moins d'échange de données. Dans le cas contraire, le nombre de collisions sera grand, d'où une grande perte de données. Ceci explique les résultats obtenus du nombre de paquets de données reçus et perdus.
- Selon l'algorithme de Trickle, le nombre de paquets DIO et DAO reçus s'explique par le nombre de fois où le DODAG a changé de routes, ce qui revient à dire que plus le nombre de ces paquets est grand plus le changement de parent préféré est fréquent. Ainsi, le DODAG construit dans un RCSF mobile utilisant la fonction OF0 est celui où il y a eu peu de changement dans la topologie. Ce qui est raisonnable vu que cette fonction se base sur l'incrément de rang par une constante. Par contre, le changement de topologie est fréquent dans un RCSF mobile qui utilise l'une des fonctions MRHOF et ARMNOF, car ces nœuds incrémentent leur rang par des variables, exemple ETX, nombre de messages DIO, etc.
- On note que le nombre de paquets DIS est le même pour un RCSF mobile quelque soit la fonction MRHOF, OF0 ou ARMNOF. La raison est que le déplacement des nœuds n'a pas conduit à la sortie de capteurs hors de la zone de couverture du réseau.

VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude de l'impact des métriques de routage sur un RCSF mobile utilisant le protocole RPL, montre qu'une fonction objective prend en compte les métriques de routages et les contraintes pour la construction d'une topologie en DODAG. On note que la mobilité des nœuds est responsable des modifications des routes dans un DODAG. En effet, le déplacement aléatoire des nœuds a pour conséquence la formation de routes dans le DODAG qui peuvent réduire ou augmenter les performances du réseau. Notre fonction ARMNOF prend en considération la mobilité et la charge de trafic, c'est pour cette raison que dans une majeure partie de la simulation, le RCSF a eu de meilleurs résultats que ceux obtenus pour les RCSF utilisant soit la fonction MRHOF, soit la fonction OF0.

Les problématiques de la mobilité des nœuds dans RCSF qu'on cherche à résoudre dans la suite de ce travail, consistent à améliorer la fonction ARMNOF pour obtenir des résultats plus performants en termes de consommation d'énergie, la perte des paquets, le duty-cycle, etc.

La fin de cet article propose une recherche de routes prenant en considération la QoS dans les applications qui exigent la mobilité des nœuds dans un RCSF.

REFERENCES

- [1] Yacine Challal, "Réseaux de Capteurs Sans Fil", Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de

Technologie de Compiègne, France, 17 Novembre 2008.

- [2] IEEE Computer Society, « 802.15.4-2003 - IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) », IEEE, octobre 2003.
- [3] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler. Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks. RFC 4944 (Draft Standard), 2007.
- [4] Adam Dunkels, « The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol », SICS Technical Report T2011:13, ISSN 1100-3154, December 2011.
- [5] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J. Vasseur, and R. Alexander. RPL : IPv6 routing protocol for low power and lossy networks. RFC 6550 (Draft Standard), Mar. 2012.
- [6] Sabine NAIMI, « Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage », Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'école doctorale STITS, Université Paris-Sud, 22 Juillet 2015.
- [7] F. BAI and A. HELMY. A survey of mobility models in wireless ad hoc networks. Chapter 2, book on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, June 2004.
- [8] Tanguy Ropitault, "Routage et Performances dans les réseaux CPL pour le Smart Grid", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'école doctorale MATISSE, Université européenne de Bretagne, 18 Juin 2015.
- [9] [En ligne], 2015, <http://www.contiki-os.org>
- [10] A. Dunkels, B. Grönvall, and T. Voigt. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on, pages 455–462. IEEE, 2004.