



## Optimizing RPL Routing By A Multi-Metric Combination

---

Abdoul Fatas Bamogo and Pasteur Poda

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

December 20, 2020

# Optimisation du routage RPL par une combinaison multi-métriques

D.O. Abdoul Fatas Bamogo et Pasteur Poda

Université Nazi BONI, Bobo-Dioulasso, BURKINA-FASO.

**Résumé.** Le développement des réseaux à faible puissance et à perte (en Anglais, Low Power and Lossy Networks (LLN)) a conduit l'IETF en 2012 à spécifier le protocole de routage RPL (Routing Protocol for Low power and Lossy Networks) pour répondre aux contraintes de routage de ces réseaux. Les performances du protocole RPL sont influencées par le choix des métriques de routage. Or, sa fonction objectif par défaut, la fonction MRHOF, se base uniquement sur la métrique ETX (indicateur de la fiabilité du lien) pour établir les chemins sans tenir compte du niveau d'énergie des nœuds du réseau ; ce qui affecte énormément la consommation énergétique des nœuds du réseau conduisant ainsi à réduire la durée de vie du réseau. Pour résoudre ce problème, nous proposons la fonction objectif ADDITIVE-OF qui s'appuie sur une combinaison additive de la métrique ETX et de la métrique énergie. L'analyse des résultats de simulation montre que la fonction ADDITIVE-OF, par rapport à la fonction MRHOF, permet d'optimiser la consommation énergétique ainsi que le taux de livraison de paquets dans le réseau.

**Mots-clés :** Internet des Objets (IdO), Réseaux LLN, Protocole RPL, Fonction MRHOF, Fonction ADDITIVE-OF.

## 1 Introduction

De nos jours, grâce au déploiement des réseaux à faible puissance et à perte (en Anglais, Low Power and Lossy Networks (LLN)), on assiste à une croissance rapide des domaines d'application de l'Internet des Objets allant de l'agriculture de précision à la santé en passant par l'industrie et bien d'autres domaines [1].

Le routage des paquets de données dans l'environnement des LLN reste toujours un défi en raison des limites intrinsèques des nœuds de capteurs en termes de : capacité mémoire, stockage, puissance de calcul et d'alimentation énergétique. Pour surmonter ces limitations de ressources, l'IETF a normalisé le protocole RPL (Routing Protocol for Low power and Lossy Networks). Le protocole RPL sélectionne le meilleur chemin en fonction de la fonction objectif. La standardisation de l'IETF définit deux fonctions objectif, à savoir OF0 (Objective Function Zero) et MRHOF (Minimal Rank with Hysteresis Objective Function), basées respectivement sur les métriques ETX (Expected Transmission Count) et le nombre de sauts. Cependant l'utilisation de ces deux fonctions objectif entraîne des problèmes d'efficacité énergétique et de perte importante de paquets [2], [3]; d'où la nécessité de trouver une fonction objectif pour le protocole RPL permettant de répondre aux exigences de qualité de service tout en tenant compte de l'efficacité énergétique dans les réseaux LLN.

L'objectif de notre étude est d'évaluer une combinaison de métriques de routage dans les LLN. Cette combinaison de métriques doit permettre d'améliorer à la fois les performances en consommation énergétique des nœuds et en taux de livraison de paquets dans le réseau.

La suite de ce manuscrit est organisée en plusieurs sections et finit par une conclusion. Dans la section 2, nous présentons des généralités sur le protocole de routage RPL. Nous y faisons également une revue de littérature sur l'optimisation des performances du protocole RPL basée sur la combinaison de métriques de routage. Dans la section 3, nous présentons l'approche proposée d'optimisation du RPL basée sur la combinaison de plusieurs métriques de routage. Dans la section 4, nous présentons le schéma des différentes simulations ainsi que les différents résultats obtenus. Enfin, nous concluons.

## **2 Présentation du protocole RPL**

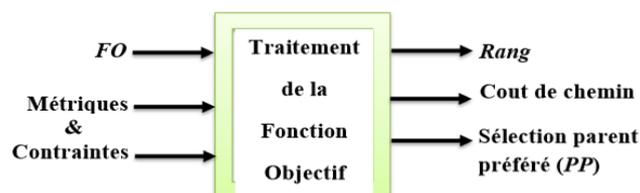
### **2.1 Introduction**

Le protocole RPL est un protocole de routage IPv6 (Internet Protocol version 6) proactif à vecteur distant. Il a été conçu par le groupe de travail ROLL de l'IETF en 2012 pour les LLN [4]. Le principe de fonctionnement du protocole RPL réside dans la construction d'un graphe appelé DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph).

Ce graphe est construit à partir d'une fonction objectif constituée de métriques et/ou de contraintes de routage. Ces métriques de routage sont des valeurs quantitatives utilisées pour trouver le coût d'un chemin et aident à prendre les décisions de routage lorsqu'il y a plusieurs chemins disponibles [5]. Les métriques du protocole RPL peuvent être classées en deux catégories : les métriques liées aux nœuds et celles liées aux liens du réseau.

## 2.2 Fonctions objectif du protocole RPL

Les fonctions objectif sont utilisées par le protocole RPL pour définir la façon dont les nœuds du réseau sélectionnent et optimisent les chemins au sein d'une instance RPL. Les fonctions objectif se basent sur des métriques ou des contraintes de routage pour le calcul du rang, le calcul du coût de chemin et la sélection par défaut des parents préférés [4]. La figure 1 montre ce principe de fonctionnement du routage RPL. Le groupe de travail ROLL de l'IETF a défini deux fonctions objectif pour le protocole de routage RPL que sont la fonction OF0 [6] et la fonction MRHOF [7]. Dans la sous-section suivante, nous nous intéressons à la fonction MRHOF.



**Fig. 1.** schéma de principe de l'utilisation des fonctions objectif en routage RPL [8].

## 2.3 Défis posés par le fonctionnement de MRHOF

MRHOF est la fonction objectif par défaut du protocole RPL. Son fonctionnement pose deux défis majeurs qui sont : la consommation énergétique et la qualité de service en effet, dans le fonctionnement de MRHOF, le choix du parent préféré est fait sur la base de la qualité du lien. La métrique ETX est alors utilisée. Ainsi, tous les nœuds auront tendance à choisir le nœud parent qui offre la meilleure qualité de liaison au détriment

des autres parents candidats sans tenir compte du niveau d'énergie de ce dernier. Cela conduit à un épuisement énergétique rapide de ces parents par rapport à leurs voisins de même rang. Ce problème est soulevé également dans [9] où il est proposé de limiter le nombre de nœuds fils par parent pour améliorer la durée de vie du réseau.

Aussi, relativement au défi de la qualité de service, les nœuds parents ayant plusieurs fils parce qu'ils offrent de meilleurs ETX vont donc constituer des goulots d'étranglement dans le réseau. En effet, ces nœuds transmettent et reçoivent plus de paquets que les autres nœuds. Cela entraîne des problèmes de gestion de qualité de service en matière de latence et de débit dans le réseau, d'où la nécessité d'équilibrer le trafic entre les différents nœuds du réseau. Ces insuffisances sont mises à nu dans [3] où il a été proposé la fonction objectif TAOF (Traffic Aware Objective Function) pour résoudre le problème de l'équilibrage de charge dans le réseau.

Pour résoudre les problèmes soulevés par le fonctionnement de la fonction objectif MRHOF plusieurs travaux de recherche ont été menés. Dans ce qui suit, nous présentons quelques-uns de ces travaux.

## 2.4 Travaux connexes

Depuis sa standardisation par le groupe de travail ROLL de l'IETF en 2012, le protocole RPL a fait l'objet d'un grand intérêt, notamment en ce qui concerne les questions de gestion d'énergie et de qualité de service dans les réseaux LLN. Ainsi, de nombreux travaux ont adressé le problème de son optimisation dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique et la qualité de service. Aussi, en dépit des deux fonctions objectif standards MRHOF et OF0, plusieurs travaux ont proposé de nouvelles fonctions objectif notamment celles basées sur la combinaison de plusieurs métriques. La combinaison multi-métriques permet de faire des compromis entre les paramètres de performances du réseau.

H. da S. Araújo *et al.*[10] ont proposé une fonction objectif appelée DQCA-OF (Delivery Quality and Context Aware-Objective Function) où sont combinés la métrique ETX, le nombre de saut et l'énergie en utilisant la logique floue. Cette fonction permet d'améliorer la latence, la durée de vie ainsi que le taux de livraison de paquets.

M. Sanmartin et al.[11] ont présenté une fonction objectif appelée SIGMA-ETX. Cette fonction s'appuie sur une combinaison de la métrique du nombre minimum de sauts et de la métrique ETX, où le meilleur itinéraire pour le routage est calculé avec l'écart type des valeurs ETX entre chaque nœud. Cette proposition est surtout conseillée pour les réseaux denses. Les simulations ont montré que l'optimisation proposée donne de meilleurs résultats par rapport à la fonction OF0 et la fonction MRHOF en termes de latence du réseau, de taux de livraison de paquets et de consommation d'énergie.

N. M. Shakya et al.[12] ont présenté la fonction objectif SEEOF (Smart Energy Efficient Objective Function) basée sur la combinaison d'une métrique dérivée de l'énergie appelée ERLT (Estimated Remaining Life Time) et la métrique ETX. La fonction SEEOF a été appliquée dans les domaines des compteurs intelligents des systèmes de distribution d'électricité et de gaz. Les résultats de la simulation montrent qu'une amélioration de 27% est obtenue dans la durée de vie du réseau lors de l'utilisation de la fonction objectif proposée.

T. R. Oliveira et al. [2] ont mis en œuvre une nouvelle fonction objectif appelée ALABAMO (A LoAd BALancing MOdel for RPL). Cette fonction vise à équilibrer le trafic entre les nœuds du réseau, par conséquent à prolonger la durée de vie du réseau. En effet, les résultats montrent qu'ALABAMO permet de réduire de moitié la consommation d'énergie des nœuds les plus sollicités dans le réseau, ce qui représente une augmentation de deux fois la durée de vie du réseau.

P. O. Kamgueu [13] a proposé deux fonctions objectif pour optimiser le routage dans les LLN. La première fonction se sert de l'unique critère énergétique, avec comme objectif principal la maximisation de la durée de vie du réseau. La deuxième fonction d'objectif proposée, vise à combiner plusieurs critères en utilisant la logique floue pour la prise en compte de la qualité de service durant le routage.

Dans ce papier, nous proposons la fonction objective ADDITIVE-OF dérivée de la fonction MRHOF s'appuyant sur l'approche combinatoire de métriques qui permet de faire un compromis entre l'efficacité énergétique et la qualité de service dans le réseau.

### 3 Fonction objectif ADDITIVE-OF

Nous avons noté précédemment deux défis liés à l'utilisation de la fonction objectif MRHOF dans le protocole RPL. Le problème de l'épuisement rapide de la batterie des nœuds parents du réseau et celui de la gestion de la qualité de service dans le réseau. Pour contribuer à les résoudre, nous proposons dans ce papier la fonction objectif ADDITIVE-OF. Dérivée de la fonction MRHOF, elle s'appuie sur l'approche combinatoire de métriques pour permettre de faire un compromis entre l'efficacité énergétique et la qualité de service dans le réseau. L'approche combinatoire de métriques proposée est basée essentiellement sur les métriques ETX et l'énergie. La métrique résultant de la combinaison s'écrit alors :

$$W = a_1 * ETX + a_2 * Energy \quad (1)$$

où,  $W$  est la métrique résultante, ETX et Energy sont les deux métriques combinées, et  $a_1$  et  $a_2$  les coefficients respectifs de ETX et de Energy tels que  $0 \leq a_1 \leq 1$  et  $a_1 + a_2 = 1$ .

Dans la combinaison donnée en (1), les deux métriques ne sont pas définies sur le même intervalle. En effet,  $ETX \in [1 ; 512]$  et l'énergie  $\in [0 ; 1]$  nous devons donc comme dans [14] normaliser ces deux métriques sur le même intervalle .

#### 3.1 Normalisation des métriques de la combinaison

Pour normaliser la combinaison (1), nous avons utilisé la solution adoptée dans [14] où la métrique énergie a été transformée de telle sorte que son intervalle coïncide avec celui de la métrique ETX. Ainsi, on obtient la métrique résultante telle que :

$$W = a_1 * ETX + a_2 * Energy2 \quad (2)$$

où,  $Energy2 = 1/Energy$  avec  $Energy \in [1.935*10^{-3} ; 1]$ . Ce qui permet à la métrique  $Energy2$  d'être définie comme la métrique ETX sur l'intervalle  $[1 ; 512]$ .

### 3.2 Analyse de la convexité de la métrique résultante

Étant donné  $p$  points de  $\mathcal{R}^n$  ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ), [15] on dit que  $x \in \mathcal{R}^n$  est combinaison convexe de ces  $p$  points s'il existe des coefficients  $m_1, m_2, \dots, m_p$  ( avec  $i = 1, 2, \dots, p$ )

$$\text{tels que } \sum_{i=1}^p m_i = 1 \text{ et } X = \sum_{i=1}^p m_i x_i .$$

Ainsi la combinaison de l'équation (2) est une combinaison linéaire convexe car le couple  $(ETX, Energy2) \in [1 ; 512]^2$  et  $\sum_{i=1}^2 a_i = 1$ . Ce résultat permet de déduire facilement les extrema de la combinaison.

Nous constatons que le choix des coefficients des métriques affecte énormément les performances du réseau. En fait, dans la combinaison plus le coefficient de la métrique ETX est élevé, plus le taux de livraison de paquets du réseau est élevé et plus l'énergie consommée par le réseau est grande et réciproquement, plus le coefficient de la métrique énergie est élevé, moins le réseau consomme d'énergie et plus les pertes de paquets sont élevées dans le réseau. Notre choix sera porté sur la combinaison pondérée (50% ETX et 50% Energy2) car elle permet de faire un compromis entre les métriques énergie et ETX en termes d'efficacité énergétique et de taux de livraison de paquets dans le réseau.

## 4 Simulation de la fonction ADDITIVE-OF

Pour montrer l'avantage de la fonction objectif ADDITIVE-OF par rapport aux fonctions objectif standards OF0 et MRHOF, nous avons effectué des simulations à l'aide du simulateur Cooja [16].

### 4.1 Paramètres de simulation

Dans cette sous-section, nous présentons les différents paramètres de notre environnement de simulation. En effet, la simulation est faite graduellement sur un réseau de 10 à 60 nœuds déployés de façon aléatoire sur une zone de couverture de  $10000 m^2$  ( 100m x 100m ). Chaque nœud du réseau va générer un paquet par seconde. Comme indicateurs de performance pour évaluer le fonctionnement des différentes fonctions objectif, nous utilisons le taux de livraison de paquets (PDR, packet delivery rate) et l'énergie

totale consommée dans le réseau. Le tableau 1 résume les différents paramètres de simulation utilisés.

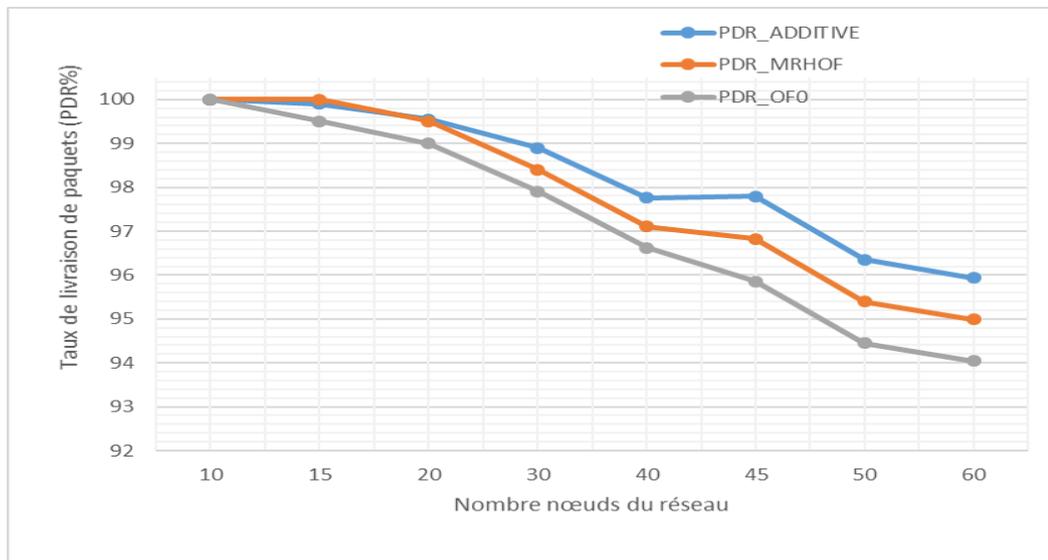
*Tableau 1 : Paramètres de simulation*

<b><u>Paramètres</u></b>	<b><u>Valeurs</u></b>
Nombre de nœuds	10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 40 ; 45 ; 50 et 60
Nombre de puits	1
Topologie	Aléatoire
Environnement radio	UDGM(Distance Loss)
Surface de couverture	10000 $m^2$ ( 100m x 100m )
Taux de génération de paquets	1 paquet/seconde/nœud
Durée de chaque simulation	1800 s
Type de capteurs	Sky mote
Fonctions objectif	MRHOF,OF0, ADDITIVE-OF

## 4.2 Résultats et Discussions

Dans cette sous-section, nous présentons les résultats de comparaison de la fonction objectif optimisée (ADDITIVE-OF) par rapport aux fonctions MRHOF et OF0.

### Selon le taux de livraison de paquets (PDR)



**Fig. 2.** Taux de livraison paquets (PDR) selon la fonction objectif utilisée

La figure **Fig.2** présente les performances des différentes fonctions objectif en termes de taux de livraison de paquets dans le réseau. On constate que lorsque la taille du réseau est inférieure à 20 nœuds, les fonctions ADDITIVE-OF et MRHOF offrent des résultats similaires. Mais à partir d'un réseau de plus de 20 nœuds, la fonction ADDITIVE-OF surpasse les autres fonctions objectif en termes de taux de livraison.

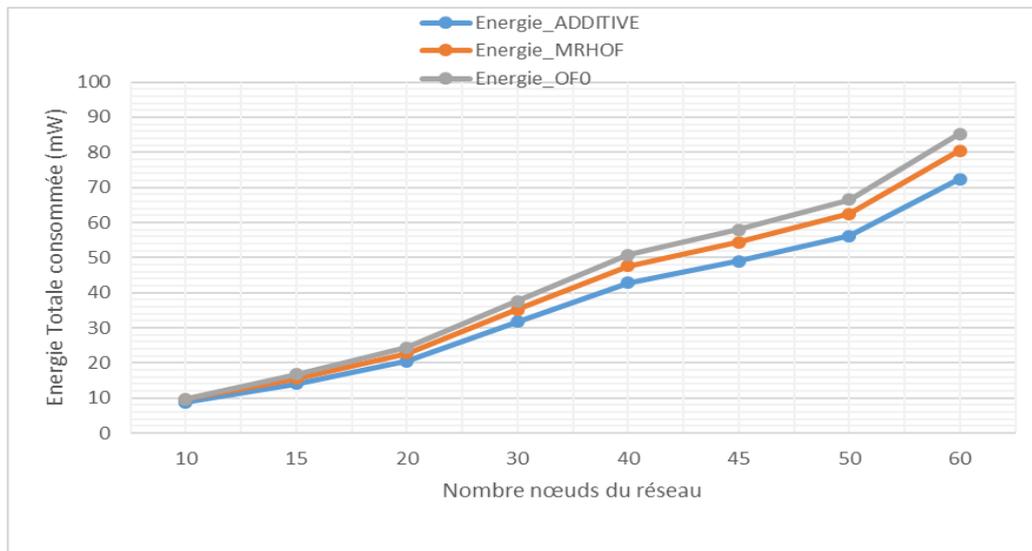
Les résultats obtenus s'expliquent par le fait que :

- la fonction objectif OF0 n'offre pas de meilleur taux de livraison de paquets par rapport aux autres car elle sélectionne le chemin optimal selon le plus petit nombre de sauts vers le puits, sans se soucier de la fiabilité des liens du chemin.
- lorsque la taille du réseau devient importante, l'utilisation de ETX comme la seule métrique de routage (MRHOF) entraîne des problèmes de qualité de service (pertes de paquets, latence) car les nœuds parents ayant plusieurs fils parce qu'ils offrent de meilleurs ETX vont donc constituer des goulots d'étranglement dans le réseau.

- La fonction objectif ADDITIVE-OF offre de meilleures performances en taux de livraison de paquets, car elle fait le choix des chemins en tenant compte du niveau d'énergie des nœuds et aussi de la qualité des liens ; ce qui permet de faire un équilibrage de charge dans le réseau.

En comparant nos résultats en termes de PDR avec ceux de [11], nous obtenons des valeurs similaires. Toutefois, la taille de réseau utilisée dans notre étude est nettement plus petite.

### Selon la métrique énergie totale consommée



*Fig.3. Energie totale consommée selon la fonction objectif utilisée*

L'énergie est une ressource critique dans les LLN. Dans **Fig.3**, nous présentons la consommation énergétique totale du réseau en fonction de la taille du réseau selon la fonction objectif utilisée. On peut y noter que, par rapport à la fonction MRHOF et la fonction OF0, la fonction objectif ADDITIVE-OF permet de réduire la consommation d'énergie, car les chemins préférés sont plus optimisés en tenant compte de la qualité de la liaison et de la consommation énergétique. Cela permet d'augmenter la durée de vie du réseau. Par contre, les fonctions objectif OF0 et MRHOF sélectionnent le chemin

optimal sans prendre en compte son coût énergétique, ce qui affecte énormément la consommation d'énergie du réseau.

En somme, au regard des résultats obtenus la fonction objectif ADDITIVE-OF permet d'améliorer à la fois les performances en consommation énergétique des nœuds et en taux de livraison de paquets dans le réseau.

## 5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons étudié le problème de l'optimisation du routage dans les réseaux LLN en lien avec des objectifs d'efficacité énergétique mais aussi de qualité de service. Nous avons proposé une fonction objectif, ADDITIVE-OF, basée sur la combinaison additive normalisée des métriques ETX et énergie pour apporter un compromis entre l'efficacité énergétique et la qualité de service. La fonction objectif ADDITIVE-OF permet, par rapport aux fonctions objectif standards (MRHOF et OF0) d'optimiser la consommation d'énergie et le taux de livraison de paquets du réseau.

## References

- [1] H. Bouzebiba and M. Lehsaini, "FreeBW - RPL : A New RPL Protocol Objective Function for Internet of Multimedia Things," *Wirel. Pers. Commun.*, no. 0123456789, 2020.
- [2] T. B. Oliveira and P. H. Gomes, "ALABAMO : A LoAd BALancing MOdel for RPL."
- [3] N. Montavont, G. Papadopoulos, R. A. Koutsiamanis, P. Chatzimisios, and D. Dujovne, "TAOF: Traffic Aware Objective Function for RPL-based Network," Oct. 2018.
- [4] "RFC 6550 - RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks." <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>.
- [5] "RFC 6551 - Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks," 2012. <https://tools.ietf.org/html/rfc6551>
- [6] "RFC 6552 - Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). <https://tools.ietf.org/html/rfc6552>.
- [7] "RFC 6719 The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function." <https://tools.ietf.org/html/rfc6719>.
- [8] D. Bendouda, "Contrôle des réseaux de capteurs et actionneurs sans fil pour la supervision," Thèse 2018, Université d'Oran .
- [9] Fadwa Boubekeur, "Les arbres couvrants de la théorie à la pratique. Algorithmes auto-stabilisants et réseaux de capteurs". Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.
- [10] H. da S. Araújo et al., "A proposal for IoT dynamic routes selection based on contextual

- information,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, pp. 1–16, 2018.
- [11] P. Sanmartin, A. Rojas, L. Fernandez, K. Avila, D. Jabba, and S. Valle, “Sigma routing metric for rpl protocol,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, Apr. 2018.
- [12] N. M. Shakya, M. Mani, and N. Crespi, “SEEOF: Smart energy efficient objective function: Adapting RPL objective function to enable an IPv6 meshed topology solution for battery operated smart meters,” in *GIoTS 2017 - Global Internet of Things Summit, Proceedings*, 2017.
- [13] Patrick Olivier Kamgueu. Configuration dynamique et routage pour l’internet des objets. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Lorraine, 2017. Français. ffNNT : 2017LORR0241ff. fftel01687704f
- [14] “Design Guidelines for Routing Metrics Composition in LLN draft-zahariadis-roll-metrics-composition-04,” pp. 1–22, 2013.
- [15] Guy Cohen. Convexité et Optimisation. Engineering school. 1999-2001 Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2000, pp.139. ffccl-00356686f
- [16] J. Ko et al. “ContikiRPL and TinyRPL: Happy Together.” (2011).