Université de Mons
Faculté des Sciences
Département d'Informatique
Réseaux et Télécommunications

Conception et évaluation d'une architecture hybride de réseaux de capteurs reposant sur les technologies radio LoRa et IEEE 802.15.4

Directeur : Mr Bruno QUOITIN

Rapporteurs : Mr Prénom NOM
Mr Prénom NOM

Mémoire réalisé par
Arnaud PALGEN

en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques

UMONS
Université de Mons

Faculté
des Sciences

Année académique 2020-2021

Remerciements

Nous remercions ...

Table des matières

Table des figures

0.1 Plateformes de développement

Zolertia RE-Mote

Pour ce mémoire, la plateforme Zolertia RE-Mote revision B(Fig. 1) est utilisée.

Cette plateforme, basée sur un system on chip (SoC) CC2538 ARM Cortex-M3, a été conçue par des universités et des industriels dans le but de permettre aux chercheurs et makers de développer des applications IoT et des objets connectés.

Le Zolertia RE-Mote a été choisi car elle est équipée de deux radios compatibles IEEE 802.15.4, permet une consommation électrique faible et possède de nombreux pins de connexion qui peuvent être utilisés pour y connecter des capteurs, actuateurs, radios, etc.

Le prix du consturcteur pour cette plateforme est de 93,95€ [14].

FIGURE 1 – Zolertia RE-Mote révision B [14].

La table 1 reprend les principales spécifications du Zolertia RE-Mote rev.b et sa table ... la consommation électique.

Element	Spécification
Radio	Deux radios IEEE 802.15.4 à 2.4 GHz et 863-950 MHz
CPU	ARM® Cortex® -M3 jusqu'à 32 MHz
RAM	32 KB (16 KB pour tous les Power Modes)
Flash programmable	512KB
I/O	RGB led, boutton user et reset, USB 2.0 à 12Mbps, Real-Time Clock

TABLE 1 – Spécifications du Zolertia RE-Mote rev.b [13].
reprend la consommation de courant du RN2483

RN2483

Le RN2483 (Fig. 2) est un modem LoRa compatible LoRaWAN^{TM} basse énergie. La communication avec ce modem ce fait par des commandes ASCII envoyée via une interface UART. Il prend en charge les modulations FSK, GFSK et LoRa. Il possède également 14 GPIOs ? ?pour le contrôle et le status, partagés avec 14 inputs analogiques. ? ?Ses fréquences opérationnelles sont situées dans les bandes de fréquences 433 MHz et 868 MHz. D'après la datasheet, sa portée maximale est de 15km en agglomération et 5km en zone urbaine. Comme l'illustre la figure. 2, pour ce mémoire, le RN2483 a été monté sur un carte d'interface réalisée par B.Quoitin qui comporte deux leds, une petite antenne ainsi que les connecteurs permettant d'utiliser des câbles de prototypages.

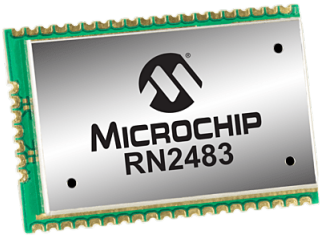


FIGURE 2 – RN2483 [10].

La figure 3 reprend le schéma-bloc du RN2483. Il contient notemment l'interface UART, les antennes 433 MHz et 868Mhz ainsi que les GPIOs et la stack LoRaWan.

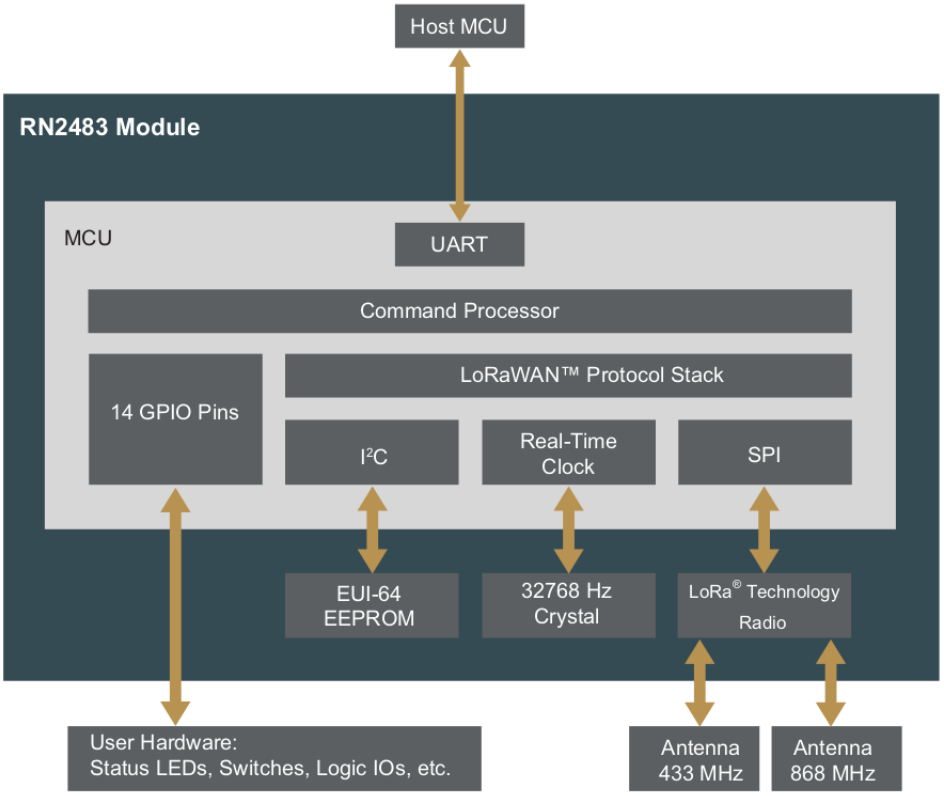


FIGURE 3 – Schéma-bloc du RN2483 [8].

La table 2 reprend la consommation électrique du RN2483 en fonction de son mode de fonctionnement.

Mode	Courant (mA)		
	VDD = 2.1V	VDD = 3.3V	VDD = 3.6V
Idle	1.7	2.8	3.1
Transmit	28.6	38.9	44.5
Sleep	0.0015	0.0016	0.0016
Receive	12.96	14.22	14.69

TABLE 2 – Consommation de courant (à 25 °C) [8].

Raspberry Pi

Le Raspberri Pi est un ordinateur monocarte. Le modèle utilisé pour ce projet est un Raspberry Pi 3 modèle B+ (Fig. 4). La table 3 reprend les

principales caractéristiques de ce modèle.

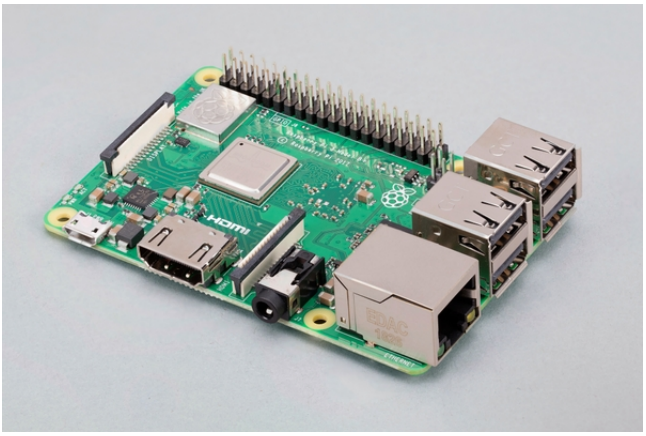


FIGURE 4 – Raspberry Pi 3B+ [9].

Element	Spécification
CPU	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC à 1.4GHz
Mémoire	1GB LPDDR2 SDRAM
Connectivité	• IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE • Gigabit Ethernet over USB 2.0 • 4 × USB 2.0 ports
Alimentation	5V/2.5A DC

TABLE 3 – Spécifications du Raspberry Pi 3B+ [9].

0.2 RTOS

Un RTOS (Real Time Operating System) est un sytème d'exploitation temps réels principalement destiné aux systèmes embarqués.

Etant donné que ce projet utilise le protocole 802.15.4 ainsi que TSCH, le RTOS choisis doit les prendre en charge ainsi qu'un ou plusieurs algorithme d'ordonnancement de TSCH.

Il est également préférable, que le RTOS choisis, supporte déjà la plateforme utilisée. Une implémentation de la LoRa n'est pas nécessaire car les communications Lora sont réalisées via le RN2483 qui est controlé par UART.

Pour effectuer ce choix, les RTOS suivants ont été comparés : Contiki OS, FreeRTOS et RIOT OS.

Contiki OS

Le développement publique de Contiki a débuté en octobre 2012 [1]. Dans un premier repository : **contiki** [2]. Un nouveau développement a démarré en mai 2017 sous le nom de **contiki-ng** [3]. C'est donc ce dernier qui est utilisé pour la comparaison est qui est dénommé par la suite "Contiki".

Ce RTOS open-source et multi-plateforme implémente toute une série de protocoles de communications basse énergie tels que IEEE 802.15.4, 6TiSCH, IPv6/6LoWPAN et RPL. En plus de 6TiSCH, un ordonnanceur TSCH, Orchestra, est implémenté.

L'implémentation des processus est basée sur la librairie Protothreads [4] qui abstrait la gestion de la programmation évènementiel par des protothread dont l'utilsations est similaire aux threads. L'ordonnenceur de cette libraire est cooperatif, c'est à dire qu'il ne va jamais forcer un changement de contexte(ensemble des ressources nécessaires à l'éxécution d'un processus) d'un processus à un autre (contrairement à un ordonnenceur préemptif). Le changement de contexte ne s'effectue que quand un processus rend volontairement le contrôle à l'ordonnanceur.

Contiki est également compatible avec le Zolertia RE-Mote. Il est accompagné de Cooja, un simulateur réseau qui permet de simuler les communications entre plusieurs noeuds utilisant Contiki.

FreeRTOS

D'après le site officiel de FreeRTOS [5], ce RTOS est développé depuis 15 ans. Le repository Github a néanmoins été créé en septembre 2019.

1. Date de création du repository Github.

Ce RTOS également open-source et multi-plateforme offre des librairies divisées en trois catégories :

- **FreeRTOS+** qui contient notemment la librairie TPC/IP et les protocoles applicatifs MQTT et HTTP,
- **AWS IoT Libraries** qui fourni des librairies permettant la connectivité avec Amazon Web Services (AWS)
- **FreeRTOS Labs** qui contient des librairies complètement fonctionelles mais qui sont encore en cours d'amélioration comme le support d'IPv6, LoRaWan ou le support de plusieurs interfaces réseau

L'ordonnanceur de tâche de FreeRTOS peut être configurer comme coopératif ou préemptif via le flag *configUSE_PREEMPTION* du fichier de configuration.

FreeRTOS n'a pour le moment pas été porté pour le Zolertia RE-Mote ou le CC2538.

RIOT OS

Le développement publique de RIOT a débuté en décembre 2012[1].

La pile réseau de RIOT comporte notemment les protocoles 6LoWPAN, IPv6, RPL, LoRaWan, 802.15.4. RIOT OS intègre la pile réseau OpenWSN [**?**] mais cette intégration est pour le moment expérimentale.

OpenWSN est une implèmentation open-source d'une pile réseau destinée à l'IoT. Cette pile réseau comprend les protocoles IEEE802.15.4e, 6LoWPAN, RPL, UDP et CoAP. L'objectif de cette implémentation est qu'elle puisse être utilisée sur une variété de RTOS et de plateformes.

L'ordonnanceur de RIOT est tickless, c'est à dire qu'il n'utilise pas un timer déclanché périodiquement pour effectuer les changements de contexte. L'ordonnanceur est préemptif et basé sur des priorités. Les changements de contexte sont initiés lors d'interruptions, volontairement ou quand une opération bloquante a lieue.

D'après le site officiel, ce RTOS supporte 229 carte de développement et 64 CPU dont le Zolertia RE-Mote.

Conclusion

Le table 4 résume la comparaison de ces RTOS avec les critères les plus importants pour ce mémoire.

RTOS	802.15.4	TSCH	ord. TSCH	IPV6	Routage IP	comp. RE-Mote
Contiki OS	√	√	6Tisch, Orchestra	√√	RPL	√
FreeRTOS	×	×	×	√	×	×
RIOT OS	√	×	×	√√	RPL	√

TABLE 4 – Comparatif de différents RTOS.

Le RTOS choisi est Contiki OS. Il est choisi pour sa maturié, la prise en charge du Zolertia RE-Mote et sa pile réseau complète et stable.

0.3 RPL

Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks [1] est un protocole de routage IPv6 destiné aux réseaux dont les noeuds sont contraints en énergie et dont les liens entre ces noeuds sont soumis à des pertes importantes de paquets (Low-power and Lossy Networks (LLNs)). Ce protocole à vecteur de distance est un protocole proactif, c'est à dire que les routes sont établies avant qu'elles ne soient nécessaires.

RPL sépare le traitement et la transmission des paquets de l'optimisation de l'objectif de routage. Cela permet de l'adapter à un large éventail d'applications des LLNs.

Topologie

La topologie utilisée par RPL est le DODAG (Destination Oriented Dag). Un DODAG est un graphe dirigé acyclique (DAG) ayant une seule racine (Fig. 5). De part cette architecture RPL est adapté aux applcations de collecte de données ce qui est le principale objectif de ce projet. En effet, la route d'un noeud à la racine est facilement établie car tous les noeuds du chemins envoient les données à leur parent.

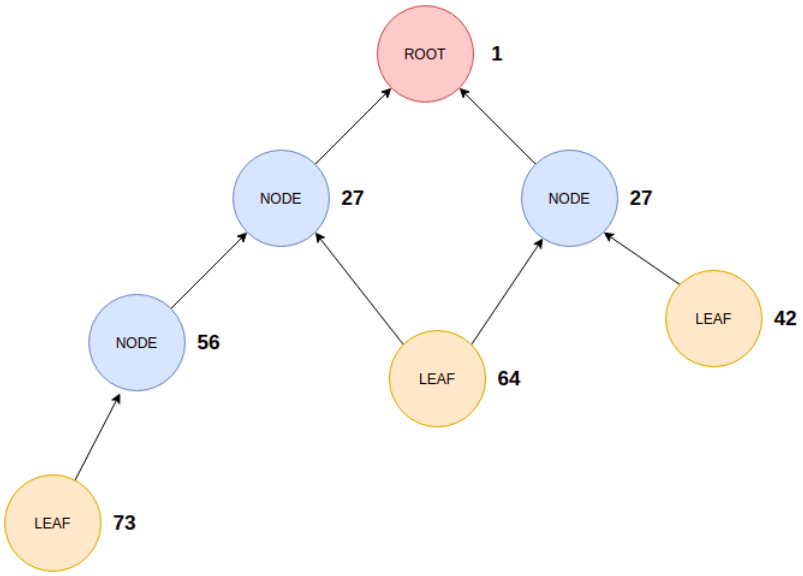


FIGURE 5 – DODAG.

Fonctions objectif

Une fonction objectif (OF) défini comment plusieurs métriques sont utilisées pour calculer le rang d'un noeud. Le rang d'un noeud détermine sa position dans le DODAG par rapport aux autres noeuds. Le rang augmente stictement dans le sens descendant et diminue strictement dans le sens montant. Ainsi, pour un noeud n, $rang(n) > rang(parent(n))$. La figure 5 illustre un DODAG avec des valeurs de rang fictives attribuées aux noeuds. Sur cet exemple, la racine du DODAG a comme rang, la valeur par défaut ROOT_RANK définie dans le RFC.

Cette section décris brièvement deux fonctions objectif implémentées dans Contiki : OF0 et MRHOF.

- **OF0**

  Objective Function Zero [11] est une fonction dont l'objectif est de choisir un parent qui permettra à un noeud d'avoir la racine du DODAG le plus proche possible. Le rang d'un noeud $R(N)$ est calculé comme suit :

  $$ranck\_increase = (Rf * Sp + Sr) * MinHopRankIncrease$$

  $$R(N) = R(P) + ranck\_increase$$

  où
  - Rf est le $rank\_factor$ et $Sr \leq stretch\_of\_rank$ avec $rank\_factor$ et $stretch\_of\_rank$ deux paramètres de la fonction
  - Sp est le $step\_of\_rank$ qui est une valeur basée sur les propriétés du lien
  - $MinHopRankIncrease$ est une constante
  - $R(p)$ est le rang d'un parent p

  $R(N)$ est calculé pour chaque parent potentiel. Le parent potentiel qui implique le plus petit $R(N)$ sera choisi.

- **MRHOF**

  Minimum Rank with Hysteresis Objective Function [6] est une fonction dont l'objectif est de sélectionner les routes qui minimisent une métrique additive en utilisant l'hystérésis pour réduire les changements de parents en réponse a de petites variations de la métrique. Pour cela, un noeud va calculer le coût des chemins avec chaque candidat parent. Ce coût sera la somme de deux éléments :

— La valeur de la métrique utlisée contenue dans les DIOs d'un candidat parent
— La valeur de la métrique for le lien entre ce noeud et le candidat parent

Si le coût d'un chemin est plus grand qu'une constante MAX_LINK_METRIC, le noeud va exclure le candidat parent utilisant ce lien.
Un noeud va choisir comme parent le candidat parent pour lequel le coût du chemin est le plus petit. Le changement de parent ne s'effectue pas si ce nouveau coût est plus petit que le coût actuel moins PARENT_SWITCH_THRESHOLD. Ceci est l'hystérésis de MRHOF.

Messages RPL

DIO

Les DIOs (DODAG Information Object) annoncent des informations sur le DODAG qui permettent aux noeuds de découvrir une instant RPL, de sélectionner un parent ou encore de maintenir le DODAG. Un DIO, illustré à la figure 6, inclu notemment les champs suivants :

- InstanceID : Identifie l'instance RPL du DODAG
- Rank : Le rang du noeud qui émet le DIO
- MOP (Mode of Operation) : Le mode d'opération de l'instance RPL (c.f. section 0.3 Modes de fonctionnements).
  0. Pas de routes descendantes
  1. Non-storing mode
  2. Storing mode sans multicast
  3. Storing mode avec multicast
- DODAGID : Adresse IPv6 définie par la racine qui identifie le DODAG

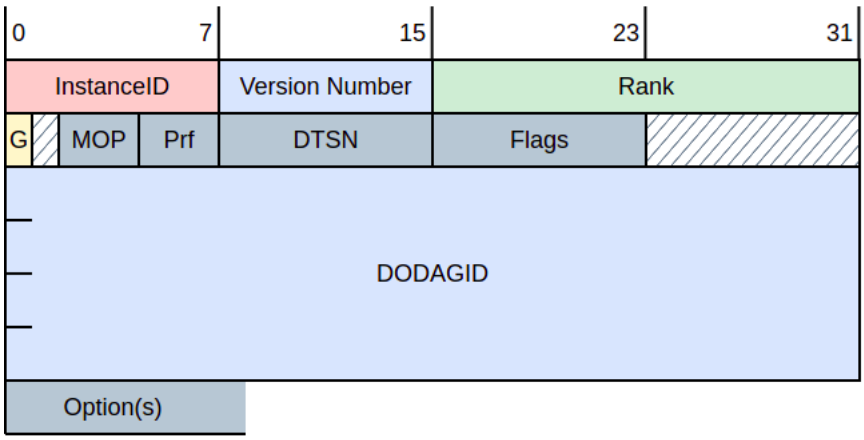


FIGURE 6 – DODAG Information Object.

Les DIOs sont transmis en utilisant l'algorithme Trickle définis dans [7].

DIS

Les DODAG Information Solocitation (DIS) sont utilisés pour solicité un DIO d'un noeud RPL.

DAO

Les DAOs (Destination Advertisement Object) sont utilisés pour établir les routes descendantes. Ils sont donc envoyés vers le haut du DODAG. Le format du DAO est illustré à la figure 7. Un DAO est composé des champs suivants :

- InstanceID : identifie l'instance du DODAG
- K : indique que le destinataire doit répondre avec un DAO-ACK
- D : indique que le DODAGID est présent
- DAOSequence : Incrémenté à chaque DAO d'un noeud et répété dans le DAO-ACK
- DODAGID (optionnel)

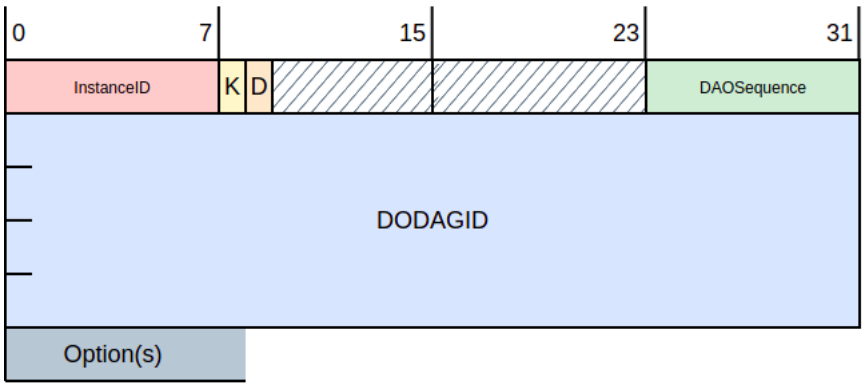


FIGURE 7 – DODAG Information Object.

DAO-ACK

Le format d'un DAO-ACK est similaire à celui d'un DAO. Il n'est donc pas utile de le décrire.

Construction du réseau

La construction d'un DODAG est réalisée via l'échange de messages DIOs pour les routes montantes et de DAOs pour les routes descendantes. La figure 8 illustre l'échange de ces messages.

Routes Montantes

Les routes montantes sont construites et maintenues avec les DIOs. L'algorithme de construction de DODAG est le suivant :

1. Les noeuds étant configurés comme racine d'un DODAG diffusent des DIOs en mutlicast à tous les noeuds RPL
2. Les noeuds voulant rejoindre un DODAG écoutent ces DIOs et utilisent leurs informations pour rejoindre le DODAG (i.e. sélectionner un parent) ou maintenir le DODAG existant en accord avec la fonction objectif
3. Les noeuds rajoutes des entrée dans leur table de routage pour les destinations spécifiées dans le DIO via leurs parents.

Si une adresse de destination n'appartient pas au DODAG, la racine du DODAG peu transférer les paquets à l'exterieur de ce réseau, ou, si elle n'en est pas capable, les ignorer.

Routes Descendantes

Les routes descendantes sont construites et maintenues avec les DAOS. L'échange des DAOs diffère selon le mode de fonctionnement (MOP) du réseau. Ces différences sont détaillées en section 0.3 Modes de fonctionnements.

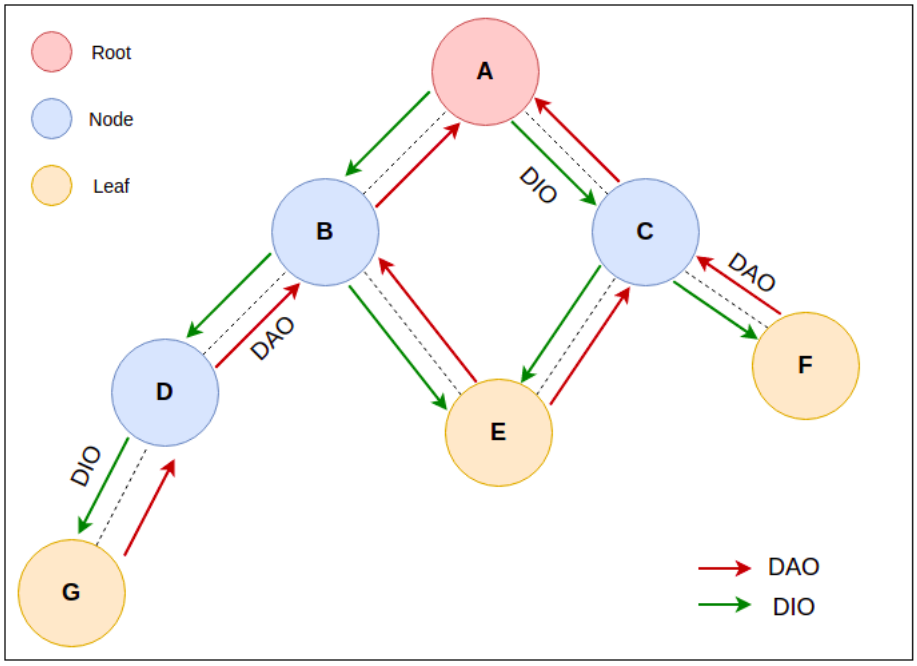


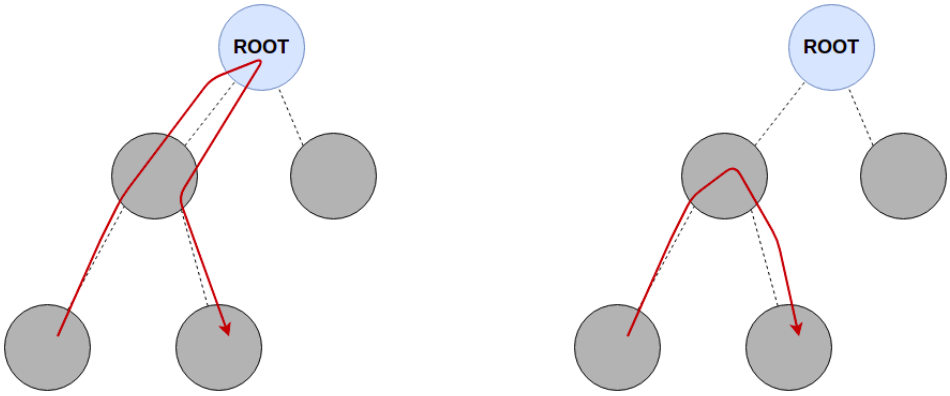
FIGURE 8 – Propagation des DIOs et DAOs.

Modes de fonctionnements

Le mode de fonctionnement d'une instance RPL, est défini administrativement et est annoncé par la racine. Les modes suivants sont disponibles :

- **Pas de routes descendantes**
  RPL ne maintient pas de routes descendantes. Dans ce MOP, les DAOs ne sont pas émis par les noeuds d'un DODAG, et les noeuds ignorent les DAOs.
- **Non-storing mode**
  Dans ce mode, les DAOs sont envoyés en unicast à la racine du DODAG. Les noeuds ne stockent pas de routes descendantes. Donc les routes sont établies par source routing. C'est à dire que les paquets remontent jusqu'à la racine du DODAG qui place dans les paquets tous les sauts de la route pour ensuite redescendre (Fig. 9a).
- **Storing mode**
  Le storing mode peut être utilisé avec ou sans multicast. Dans ce

mode, les DAOs sont envoyées en unicast par les noeuds à leur parent(s) Les paquets remontent jusqu'à un ancêtre commun avec la destination avant de redescendre vers celle-ci (Fig. 9b). Les noeuds stockent les routes de leur sous DODAG. Ainsi, chanque saut dans un chemin examine sa table de routage pour choisir le saut suivant.



(a) Non-Storing. (b) Storing.

FIGURE 9 – Chemin d'un paquet en fonction du MOP.

Un noeud voulant rejoindre un DODAG doit être compatible avec le MOP du DODAG. Si ce n'est pas le cas, il doit rejoindre le DODAG comme feuille.

Discussion

D'après [12], après avoir été étudiés par le groupe de travail IETF roll (Routing Over Low power and Lossy networks (roll), il s'est avéré que les protocoles tel que OSPF, AODV ou OLSR ne satisfont pas toutes les exigences des LLNs. C'est pour cette raison que ce groupe de travail a introduit RPL.

De plus, de part sa topologie et son fonctionnement, RPL est optimisé pour la collecte de données ce qui est l'utilisation principale pour ce mémoire.

Bibliographie

[1] Roger Alexander, Anders Brandt, JP Vasseur, Jonathan Huii, Kris Pister, Pascal Thubert, P Levis, Rene Struik, Richard Kelsey, and Tim Winter. RPL : IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC 6550, March 2012.

[2] The Contiki Operating System. `https://github.com/contiki-os/contiki`. [Accès en ligne le 15 juin 2021].

[3] Contiki-NG : The OS for Next Generation IoT Devices. `https://github.com/contiki-ng/contiki-ng`. [Accès en ligne le 15 juin 2021].

[4] Adam Dunkels, Oliver Schmidt, Thiemo Voigt, and Muneeb Ali. Protothreads : Simplifying event-driven programming of memory-constrained embedded systems. In *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '06, page 29–42, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.

[5] FreeRTOS Real-time operating system for microcontrollers. `https://freertos.org/index.html`. [Accès en ligne le 15 juin 2021].

[6] Omprakash Gnawali and P Levis. The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function. RFC 6719, September 2012.

[7] P Levis, Thomas H. Clausen, Omprakash Gnawali, Jonathan Huii, and JeongGil Ko. The Trickle Algorithm. RFC 6206, March 2011.

[8] Microchip. *Low-Power Long Range LoRa ® Technology Transceiver Module*, 6 2020. Rev. E.

[9] Raspberry Pi 3 Model B+. `https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/`. [Accès en ligne le 15 juin 2021].

[10] RN2483. `https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483`. [Accès en ligne le 14 juin 2021].

[11] Pascal Thubert. Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6552, March 2012.

[12] Joydeep Tripathi, Jose Oliveira, and J.-P Vasseur. A performance evaluation study of rpl : Routing protocol for low power and lossy networks. pages 1–6, 03 2010.

[13] Zolertia. *Zolertia RE-Mote Revision B Internet of Things hardware development platform, for 2.4-GHz and 863-950MHz IEEE 802.15.4, 6LoWPAN and ZigBee® Applications*, 9 2016. v.1.0.0.

[14] Zolertia RE-Mote. `https://zolertia.io/product/re-mote/`. [Accès en ligne le 14 juin 2021].