

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 : M^r Bruno QUOITIN

Mémoire réalisé par
Arnaud PALGEN

Rapporteurs : M^r Prénom NOM
M^r Prénom NOM

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



Année académique 2020-2021

Remerciements

Nous remercions ...

Table des matières

0.1	Plateformes de développement	2
0.2	RTOS	6
0.3	RPL	9
0.4	IEEE 802.15.4e	15
0.4.1	TSCH (Time Slotted Channel Hopping)	18

Table des figures

1	Zolertia RE-Mote révision B [16].	2
2	RN2483 [12].	3
3	Schéma-bloc du RN2483 [9].	4
4	Raspberry Pi 3B+ [11].	5
5	DODAG.	9
6	DODAG Information Object.	12
7	DODAG Information Object.	13
8	Propagation des DIOs et DAOs.	14
9	Chemin d'un paquet en fonction du MOP.	15
10	802.15.4 structure de la Superframe.	17
11	Slotframe.	18
12	Time Slotted Channel Hopping.	19

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 constructeur pour cette plateforme est de 93,95€ [16].



FIGURE 1 – Zolertia RE-Mote révision B [16].

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

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, bouton user et reset, USB 2.0 à 12Mbps, Real-Time Clock

TABLE 1 – Spécifications du Zolertia RE-Mote rev.b [15].
reprend la consommation de courant du RN2483

RN2483

Le RN2483 (Fig. 2) est un modem LoRa compatible LoRaWANTM basse énergie. La communication avec ce modem se 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 une 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.

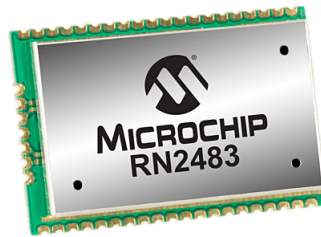


FIGURE 2 – RN2483 [12].

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

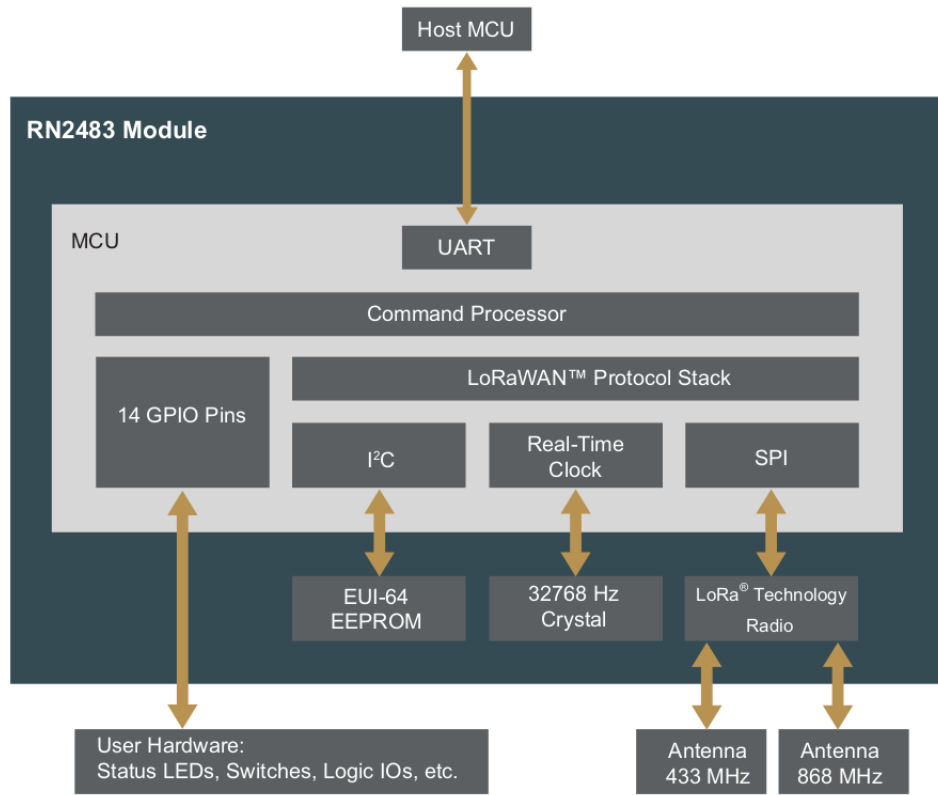


FIGURE 3 – Schéma-bloc du RN2483 [9].

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) [9].

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.

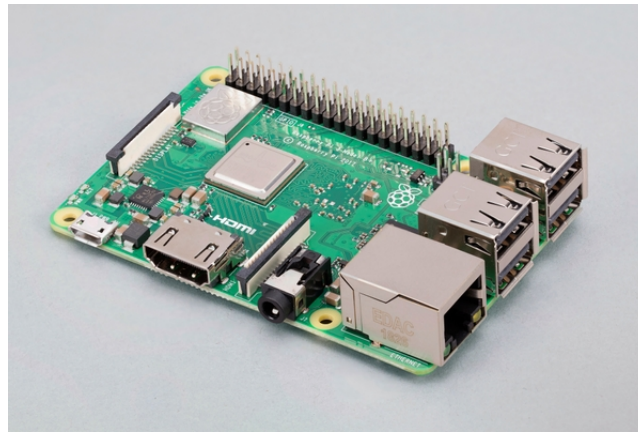


FIGURE 4 – Raspberry Pi 3B+ [11].

Element	Spécification
CPU	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC à 1.4GHz
Mémoire	1GB LPDDR2 SDRAM
Connectivité	<ul style="list-style-type: none">• 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+ [11].

0.2 RTOS

Un RTOS (Real Time Operating System) est un système 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 algorithmes 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 contrôlé par UART.

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

Contiki OS

Le développement public de Contiki a débuté en octobre 2012¹. 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 et 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 [5] qui abstrait la gestion de la programmation événementiel par des protothread dont l'utilisation est similaire aux threads. L'ordonnanceur de cette librairie est coopératif, c'est à dire qu'il ne va jamais forcer un changement de contexte (ensemble des ressources nécessaires à l'exécution d'un processus) d'un processus à un autre (contrairement à un ordonnanceur 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 nœuds utilisant Contiki.

FreeRTOS

D'après le site officiel de FreeRTOS [6], 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 bibliothèques divisées en trois catégories :

- **FreeRTOS+** qui contient notamment la bibliothèque TCP/IP et les protocoles applicatifs MQTT et HTTP,
- **AWS IoT Libraries** qui fournissent des bibliothèques permettant la connectivité avec Amazon Web Services (AWS)
- **FreeRTOS Labs** qui contiennent des bibliothèques complètement fonctionnelles mais qui sont encore en cours d'amélioration comme le support d'IPv6, LoRaWan ou le support de plusieurs interfaces réseau

L'ordonnanceur de tâches de FreeRTOS peut être configuré 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 public de RIOT a débuté en décembre 2012¹.

La pile réseau de RIOT comporte notamment les protocoles 6LoWPAN, IPv6, RPL, LoRaWan, 802.15.4. RIOT OS intègre la pile réseau OpenWSN [10] mais cette intégration est pour le moment expérimentale.

OpenWSN est une implémentation 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 déclenché 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 lieu.

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

Conclusion

Le tableau 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 maturité, 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 applications 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.

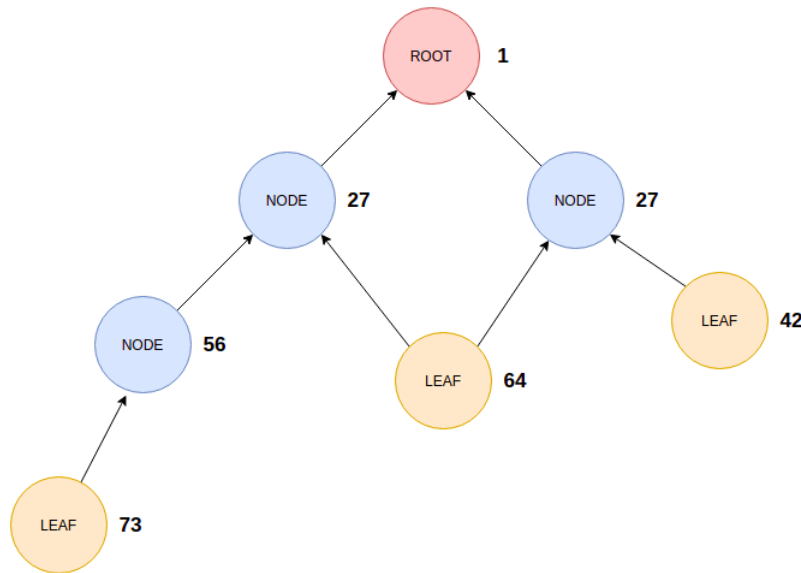


FIGURE 5 – DODAG.

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 strictement 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 décrit brièvement deux fonctions objectif implémentées dans Contiki : OF0 et MRHOF.

• OF0

Objective Function Zero [13] 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 :

$$rank_increase = (Rf * Sp + Sr) * MinHopRankIncrease$$

$$R(N) = R(P) + rank_increase$$

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 [7] 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 à 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 utilisée 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

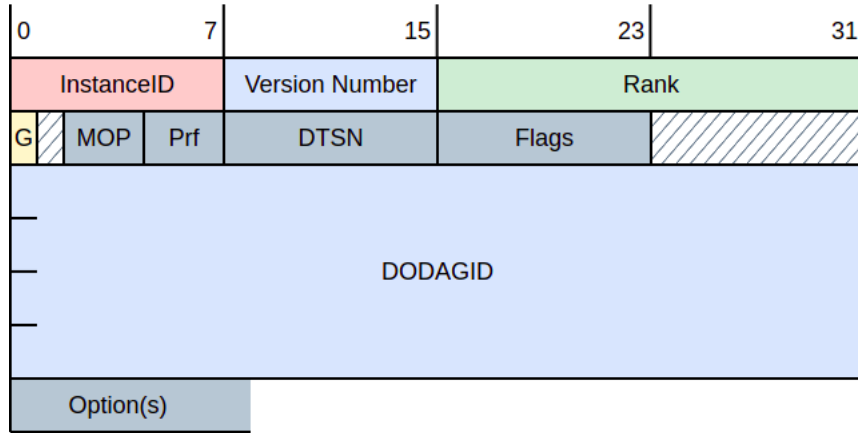


FIGURE 6 – DODAG Information Object.

Les DIOs sont transmis en utilisant l'algorithme Trickle définis dans [8].

DIS

Les DODAG Information Solocitation (DIS) sont utilisés pour solliciter 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)

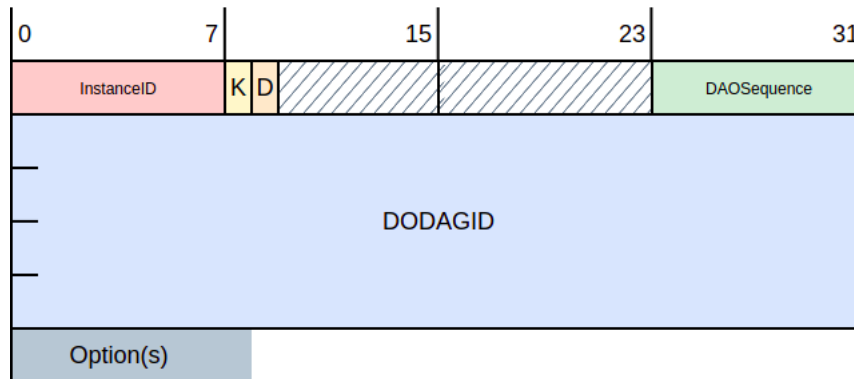


FIGURE 7 – DODAG Information Object.

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'extérieur 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.

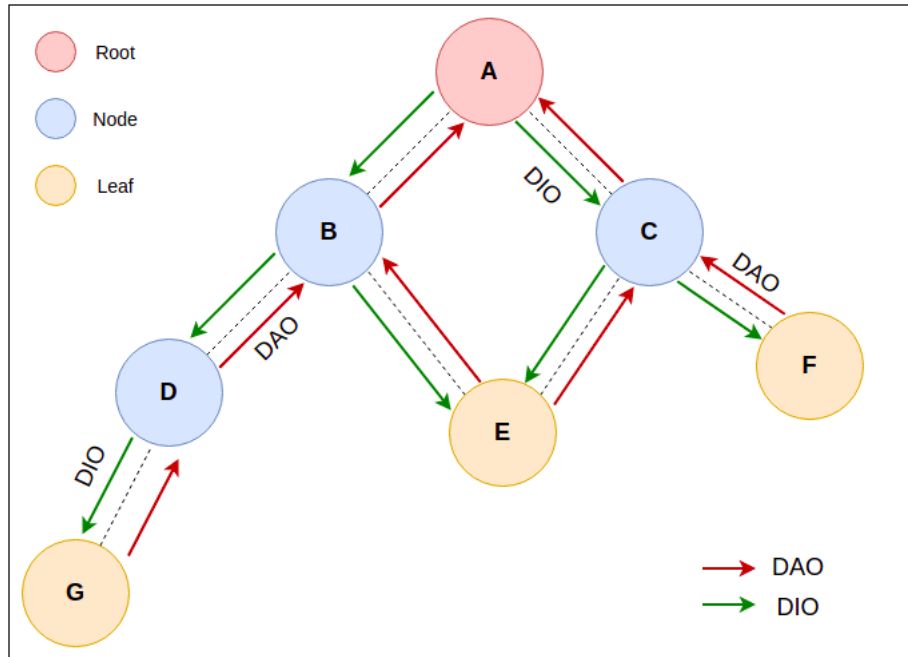


FIGURE 8 – Propagation des DIOs et DAOs.

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, chaque saut dans un chemin examine sa table de routage pour choisir le saut suivant.

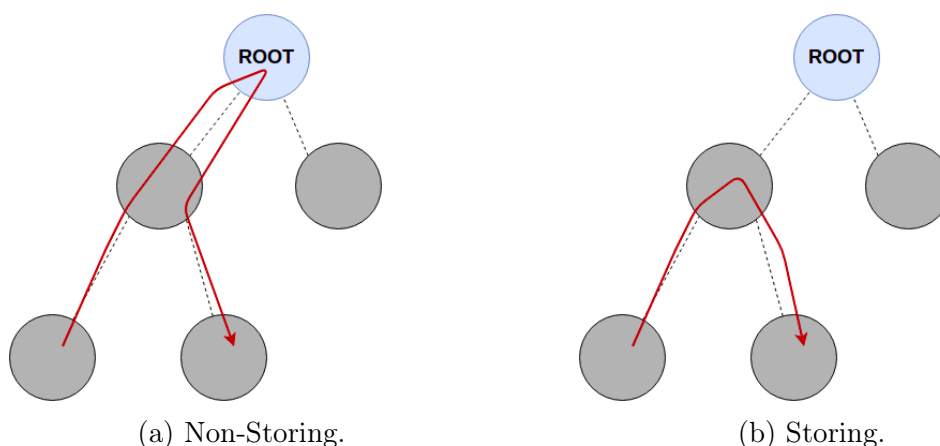


FIGURE 9 – Chemin d'un paquet en fonction du MOP.

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 [14], 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.

0.4 IEEE 802.15.4e

802.15.4 est un protocole définis par IEEE en 2003. Il est destiné aux communications à débit faibles réalisées par des dispositifs ayant une alimentation en énergie limitée. Ce protocole qui est un standart pour les réseaux PANs (Personak Area Networks) couvre la couche physique et MAC

du modèle OSI. En 2012, IEEE 802.15.4e a été défini pour palier à certains problèmes de IEEE 802.15.4.

IEEE 802.15.4

Types de noeuds et topologie

Cette norme définit deux types de noeuds : les Full Function Devices (FFD) qui peuvent être des coordinateurs de PAN, de simples coordinateurs ou de simples noeuds et les Reduced Function Device (RFD) qui utilisent une implémentation réduite du protocole et ne peuvent être que de simples noeuds.

Ces noeuds peuvent former des réseaux suivant plusieurs topologies comme la topologie en étoile pour laquelle plusieurs RFD sont connectés à un FFD qui joue le rôle de coordinateur ou encore la topologie peer-to-peer pour laquelle les FFD sont connectés les uns aux autres.

Modes d'accès

802.15.4 définit deux modes d'accès : Beacon Enabled mode et Non-Beacon Enabled mode. Dans le premier, le réseau est synchronisé par des messages de contrôle (beacons) et une structure appelée Superframe.

Comme l'illustre la figure 10, cette Superframe est divisée en deux périodes : la période active et la période inactive. La période active est elle-même divisée en deux périodes : contention access period (CAP) et contention free period (CFP). Dans la première, l'accès au canal se fait par l'algorithme CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

Dans la deuxième, l'accès au canal se fait par TDMA (Time Division Multiple Access). C'est à dire que les 7 slots de cette période sont attribués par le coordinateur aux noeuds ayant émis une requête durant la CAP pour l'utilisation d'un slot.

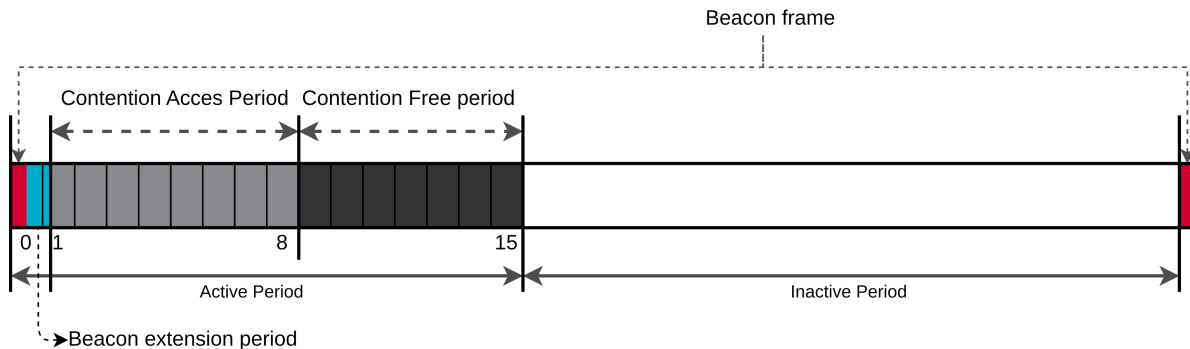


FIGURE 10 – 802.15.4 structure de la Superframe.

Dans le mode Non-Beacon Enabled, il n'y a pas de synchronisation. l'accès au canal se fait par l'algorithme Unslotted CSMA-CA.

IEEE 802.15.4e

802.15.4 a un certains nombres de limitations. [4] met les limitations suivantes en évidence :

- Aucune garantie sur le délai maximal pour qu'un paquet puisse atteindre sa destination ne peut être fourni avec l'algorithme CSMA-CA.
- La fiabilité des communications est limitée par l'utilisation de l'algorithme slotted CSMA-CA qui offre un taux de transmission faible.
- Aucune protection contre les interférences due à l'utilisation d'un seul canal et à l'absence de mécanismes de sauts de fréquence (frequency hopping)

Ces limitations ont menées à la création de 802.14.4.e en 2012 qui redéfinit les protocoles MAC du standard. Ainsi, 5 modes de fonctionnement de la couche MAC sont introduits :

1. Time Slotted Channel Hopping (TSCH)
2. Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME)
3. Low Latency Deterministic Network (LLDN)
4. Asynchronous multi-channel adaptation (AMCA)
5. Radio Frequency Identification Blink (BLINK)

D'après [4], le standard ne définit que brièvement AMCA et BLINK. LLDN est destiné aux réseaux à un seul saut et utilisant un seul canal. Il n'est donc pas pertinent pour ce projet. DSME utilise le concept de multi-superframe semblable aux superframe de IEEE 802.15.4 mise à part la CFP qui divise chacun des 7 slots en plusieurs fréquences.

0.4.1 TSCH (Time Slotted Channel Hopping)

Ce mode de fonctionnement de la couche MAC, comme son nom l'indique, supporte à la fois les sauts en fréquence et des communications divisées en temps. Ces mécanismes réduisent efficacement les effets des interférences et les collisions ce qui améliore la fiabilité du réseau.

Slotframe

Dans ce mode, le concept de superframe de 802.15.4 est remplacé par le concept de slotframe. Une slotframe est un intervalle de temps qui est divisé en timeslots. Chaque timeslot permet à un nœud d'envoyer une trame et d'éventuellement recevoir son acquittement (ack). Chaque timeslot possède un identifiant appelé *Absolute Slot Number* (ASN) et un identifiant au sein de la slotframe appelé *Time Slot Number* (TSN).

TSCH permet l'utilisation de timeslots partagés et dédiés. Dans les timeslots partagés plusieurs nœuds peuvent communiquer. Dans ce cas, CSMA/CA est utilisé. Pour les timeslots dédiés, seul deux nœuds peuvent communiquer. La figure 11 illustre une slotframe composée de trois timeslots. Dans cet exemple, on considère 3 nœuds : N, T et U. Chaque timeslot permet une communication entre deux nœuds. Par exemple le timeslot ayant comme TSN 0, permet à N de transmettre vers T.

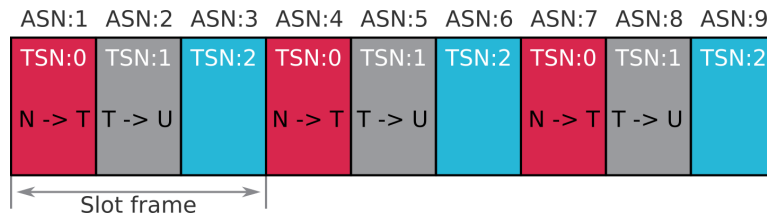


FIGURE 11 – Slotframe.

Channel Hopping

TSCH peut utiliser 16 canaux différents numérotés de 0 à 15. Un lien entre deux nœuds dans TSCH est alors défini par la paire (timeslot, canal). Ainsi, chaque slot frame est divisée par le nombre de canaux utilisé dans le réseau (Fig. 12). Soit f la fréquence utilisée pour la communication entre deux nœuds :

$$f = F[(ASN + channelOffset) \% N_{channels}]$$

où $N_{channels}$ est le nombre de canaux utilisés pour le réseau. F peut être vue comme une table qui contient une séquence de canaux.

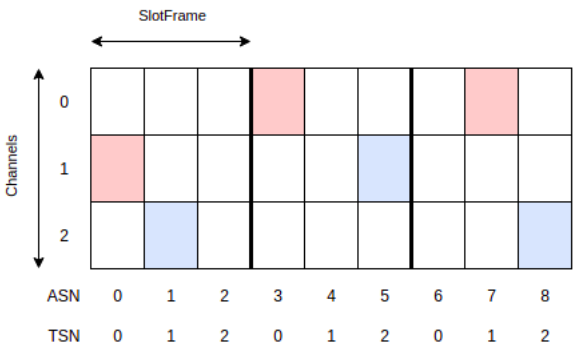


FIGURE 12 – Time Slotted Channel Hopping.

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] Domenico De Guglielmo, Simone Brienza, and Giuseppe Anastasi. Ieee 802.15.4e : A survey. *Computer Communications*, 88 :1–24, 2016.
- [5] 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.
- [6] FreeRTOS Real-time operating system for microcontrollers. <https://freertos.org/index.html>. [Accès en ligne le 15 juin 2021].
- [7] Omprakash Gnawali and P Levis. The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function. RFC 6719, September 2012.
- [8] P Levis, Thomas H. Clausen, Omprakash Gnawali, Jonathan Huii, and JeongGil Ko. The Trickle Algorithm. RFC 6206, March 2011.
- [9] Microchip. *Low-Power Long Range LoRa (®) Technology Transceiver Module*, 6 2020. Rev. E.
- [10] OpenWSN. <https://openwsn.atlassian.net/wiki/spaces/OW/overview?mode=global>. [Accès en ligne le 22 juin 2021].
- [11] Raspberry Pi 3 Model B+. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>. [Accès en ligne le 15 juin 2021].
- [12] RN2483. <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>. [Accès en ligne le 14 juin 2021].

- [13] Pascal Thubert. Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL). RFC 6552, March 2012.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Zolertia RE-Mote. <https://zolertia.io/product/re-mote/>. [Accès en ligne le 14 juin 2021].