

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de Mathématiques et informatique
Filière : Informatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique

Option : **Réseaux et Systèmes**

Présenté par :

SELLA Hafsa

THEME :

**Analyse des algorithmes d'ordonnancement dans
les réseaux (IPv6 over the TSCH mode of IEEE
802.15.4e - 6TiSCH)**

Présenté par SELLA Hafsa

Encadré par Mme. Abid Meriem

Année Universitaire : 2023-2024

Résumé :

Le projet de fin d'étude vise à fournir une analyse approfondie de la norme IEEE 802.15.4e, en mettant l'accent sur son mode TSCH (Time Slotted Channel Hopping), qui est crucial pour les réseaux de capteurs sans fil à faible consommation d'énergie dans les applications IoT (Internet des objets) et IoT industriels. Il met en évidence la technologie 6TiSCH, qui intègre le TSCH avec IPv6 pour améliorer la fiabilité, le déterminisme et l'efficacité énergétique dans les réseaux sans fil industriels. Divers algorithmes d'ordonnement sont discutés, notamment l'ordonnement centralisé, distribué, autonome et hybride, chacun ayant ses forces et ses faiblesses en termes de surcharge de communication, de flexibilité, de scalabilité et d'adaptabilité. Des métriques de performance clés telles que le taux de livraison de paquets (PDR), le cycle de service et le changement de parent RPL sont utilisées pour évaluer les performances du réseau. Le rapport utilise l'outil de simulation COOJA pour évaluer l'approche Orchestra à travers diverses topologies de réseau. Il conclut que cette approche, combinée avec 6TiSCH, offre des avantages significatifs pour les applications IoT industrielles.

Mots-clés : IIoT, IEEE 802.15.4, TSCH, 6TiSCH, Ordonnanceur, Orchestra

Abstract :

This project aims to provide an in-depth analysis of the IEEE 802.15.4e standard, focusing on its TSCH (Time Slotted Channel Hopping) mode, which is crucial for low-power wireless sensor networks in IoT (Internet of Things) and industrial IoT applications. It highlights the 6TiSCH technology, which integrates TSCH with IPv6 to improve reliability, determinism, and energy efficiency in industrial wireless networks. Various scheduling algorithms are discussed, including centralized, distributed, autonomous, and hybrid scheduling, each with its strengths and weaknesses in terms of communication overhead, flexibility, scalability, and adaptability. Key performance metrics such as packet delivery ratio (PDR), duty cycle, and RPL parent change are used to evaluate network performance. The report uses the simulation tool COOJA to evaluate the Orchestra approach across various network topologies. It concludes that this approach combined with 6TiSCH offers significant advantages for industrial IoT applications.

Keywords : IIoT, IEEE 802.15.4, TSCH, 6TiSCH, Scheduler, Orchestra

Remerciements

Je tiens à remercier dieu, tout puissant pour la santé et la volonté qu'il m'a
donnée pendant toutes ces années d'étude.

Je tiens à remercier mon encadrante Madame « ABID Meriem », je la remercie
de m'avoir encadré, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses
remarques et ses conseils.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté
d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mes respects et mes
gratitudes

Merci à vous tous.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma famille, pour leur amour infini, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure.

À mes professeurs, pour leur expertise, leur patience et leur passion qui m'ont inspiré à atteindre de nouveaux sommets intellectuels.

À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur soutien, leur aide et leurs encouragements, je vous dédie ce mémoire avec gratitude et reconnaissance.

Liste des figures

Figure N°	Titre de la figure	Page
Figure1	Topologies supportées dans IEEE 802.15.4	13
Figure2	Le mode TSCH	19
Figure3	La pile de protocoles pour les réseaux	21
Figure4	Interface de simulateur Cooja	34
Figure5	Topologie 1	39
Figure6	Charge de consommation énergétique	39
Figure7	Le cycle de service radio	40
Figure8	Jointure radio	40
Figure9	Le taux des accusées de réception des paquets	41
Figure10	Le taux de PDR	41
Figure11	Rpl switching	42
Figure12	Topologie 2	42
Figure13	Charge de consommation énergétique	43
Figure14	Le cycle de service radio	43
Figure15	Jointure radio	44
Figure16	Le taux des accusées de réception des paquets	44
Figure17	Le taux de livraison de paquets	45
Figure18	Rpl switching	45
Figure19	Topologie 3	46
Figure20	Charge de consommation énergétique	46
Figure21	Le cycle de service radio	47
Figure22	Jointure radio	47
Figure23	Le taux des accusées de réception des paquets	48
Figure24	Le taux de livraison de paquets	48
Figure25	Rpl switching	49

Liste des tableaux

TableauN°	Titre du tableau	Page
Tableau1	Différentes couches PHY	16
Tableau2	Analyse des approches d'ordonnement	30

Liste des abréviations.

Abréviation	Expression Complète	Page
IoT	Internet of Things	13
IIoT	Industrial Internet of Things	11
TSCH	Time Slotted Channel Hopping	11
6TiSCH	IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e	20
PAN	Personnel area network	12
MAC	Medium access control	11
DSME	Deterministic & Synchronous Multi-channel Extension	18
LLDN	Low Latency Deterministic Network	18
TSMP	Time Synchronized Mesh Protocol	18
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks	21
DODAG	Destination Oriented Directed Acyclic Graph	21
6TOP	6TiSCH Operation Sublayer	21
PCE	Path Computation Element	23
TASA	Traffic Aware Scheduling Algorithm	24
MODESA	Multichannel Optimized Delay Time Slot Assignment	24
OTF	Opportunistic Traffic Scheduling	24
EOTF	Enhanced On-The-Fly	25
EB	Enhanced Beacon	18
SF	Scheduling function	21

Table des matières .

Introduction Générale

Chapitre 1 : Communications dans les réseaux d'objets industriel

1. Introduction	11
2.Généralités sur l'Internet des objets Industriel (IIoT)	11
2.1. Topologie des réseaux IIoT.....	12
2.2. Contraintes des réseaux IIoT.....	13
3.Les technologies de communication des réseaux IIoT.....	14
4.Les méthodes fondamentales d'accès au canal de communication partagé.....	14
5.IEEE 802.15.4.....	15
5.1Les fonctionnalités de la couche physique dans IEEE 802.15.4.....	16
5.2. Couche PHY.....	16
5.3. Sous-couche MAC.....	17
6. Amélioration de l'IEEE 802.15.4 : IEEE 802.15.4e.....	17
7. Le mode TSCH de l'IEEE802.15.4.....	18
Conclusion:.....	19

Chapitre 2 : Etat de l'art

1.Introduction	20
2.Architecture 6TiSCH.....	20
3.La couche 6TiSCH.....	21
4.La sous-couche opérationnelle 6TiSCH (6top).....	22
5.Fonction d'ordonnancement.....	23
6.Ordonnancement dans les réseaux 802.15.4e TSCH	23
6.1. Ordonnancement centralisé	23
6.2. Ordonnancement distribué	24
6.3. Ordonnancement autonome.....	25
6.4. Ordonnancement hybride.....	27
7.Minimal Scheduling Function.....	29
8.Les avantages et les inconvénients.....	30
Conclusion.....	31

Chapitre 3 : Méthodologie d'évaluation des algorithmes d'ordonnement

1. Introduction	32
2. Fonctionnement d'orchestra	32
2.1. Planification basée sur le récepteur	32
2.2. Planification basée sur l'expéditionneur	33
2.3. Utilisation dans Contiki- NG.....	33
3. Simulateur COOJA.....	33
4. Critères	34
5. Définition des différents critères	35
5.1. Charge de la consommation énergétique	35
5.2. Le PDR (Paquet Delivery Ration)	35
5.3. Le Duty cycle (ou cycle de service).....	35
5.4. Jointure radio.....	36
5.5. le taux d'accusés de réception des paquets.....	36
5.6. RPL switching	36
6. Scénario	37
Conclusion	37

Chapitre 4: Résultats

1.Introduction.....	38
2.Topologie 1.....	38
3.Topologie 2.....	42
4.Topologie 3.....	46
5.Résultats	50
6.Inconvénient d'Orchestra.....	51
Conclusion:	52
Conclusion Générale et perspectives	53

Introduction Générale

Les réseaux industriels sans fil basés sur l'Internet des Objets (IIoT) nécessitent des communications fiables, déterministes et économes en énergie pour prendre en charge les applications critiques de contrôle et d'automatisation.

La technologie 6TiSCH (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) émerge comme une solution prometteuse répondant à ces exigences.

6TiSCH repose sur le mode TSCH de la norme IEEE 802.15.4e, qui permet une coordination temporelle et fréquentielle des transmissions sans fil. Cette approche combinant multiplexage temporel et fréquentiel améliore considérablement la fiabilité des communications et l'efficacité énergétique par rapport aux protocoles sans fil traditionnels.

Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel de l'architecture 6TiSCH, la conception d'algorithmes d'ordonnancement performants et adaptés est primordiale. Ces algorithmes déterminent l'allocation optimale des ressources radio de temps et de fréquence aux différents nœuds du réseau maillé, impactant directement les délais, le débit, la fiabilité et la consommation énergétique.

Dans ce contexte, de nombreux algorithmes d'ordonnancement avec diverses approches ont été proposés, chacun offrant des compromis entre optimalité, complexité, tolérance aux pannes, support de la qualité de service et adaptabilité. Le choix de l'algorithme le plus adapté dépendra des contraintes spécifiques de l'application industrielle visée. Cette problématique de l'ordonnancement dans les réseaux 6TiSCH fait l'objet d'intenses recherches afin de répondre à la diversité des cas d'usage IIoT. Pour répondre à cette problématique, nous avons analysé la performance de l'approche Orchestra à travers des critères dans trois topologies différentes.

Le mémoire est organisé comme suit. Le chapitre 1 couvre les concepts de base nécessaires à la compréhension des réseaux IIoT, y compris les technologies de communication utilisées, comme la norme IEEE 802.15.4e et son mode TSCH. Il discute également des topologies de réseau, des contraintes et des méthodes d'accès au canal partagé. Le chapitre 2 intitulé « État de l'art » explore en détail la technologie 6TiSCH et les divers algorithmes d'ordonnancement utilisés pour optimiser les performances du réseau. Il décrit l'architecture de 6TiSCH, la couche et la sous-couche opérationnelle, ainsi que les différentes approches d'ordonnancement (centralisé, distribué, autonome et hybride). Le chapitre 3 introduit la méthodologie d'évaluation des algorithmes d'ordonnancement. L'objectif de ce chapitre est de décrire la méthodologie utilisée pour évaluer les algorithmes d'ordonnancement. Il

présente les critères d'évaluation, l'utilisation de Contiki-NG et son simulateur Cooja, et les critères d'évaluation pour analyser l'impact des algorithmes sur les performances du réseau.

Enfin, le chapitre 4 de ce rapport se concentre sur l'analyse des performances de l'algorithme d'ordonnancement Orchestra, proposé pour les réseaux IoT industriels utilisant la technologie 6TiSCH. Le chapitre analyse également les résultats des simulations.

Enfin, ce mémoire se conclut par une conclusion générale et quelques perspectives qui résume les résultats de l'étude et propose des perspectives pour des recherches futures.

Chapitre 1 : Communications dans les réseaux d'objets industriels

1. Introduction

Les applications industrielles basées sur l'Internet des objets nécessitent des communications fiables, déterministes et à faible consommation.

Ces réseaux utilisent plusieurs technologies parmi lesquelles la norme IEEE 802.15.4^e et son TSCH pour leur communication sans fil. Cette dernière permettant une coordination temporelle et fréquentielle des transmissions afin d'améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique.

Dans ce chapitre nous allons revenir sur concepts de base nécessaires à la compréhension du contexte de notre travail et qui nous permettront de mettre en lumière la problématique de l'ordonnement dans ces réseaux

2. Généralités sur l'Internet des objets Industriel (IIoT) :

L'émergence de l'Internet des Objets Industriel (ou Internet of Things - IIoT) est amenée à transformer en profondeur la conception et le fonctionnement des systèmes industriels. L'interconnexion généralisée des composants physiques comme les machines, capteurs et actionneurs avec les systèmes informatiques permettra de créer un environnement cyber-physique intégré. Cette convergence du monde physique et numérique au sein des usines et sites de production industrielle ouvrira la voie à de nouveaux cas d'usage avant-gardistes.

Parmi les fonctionnalités clés rendues possibles, on peut citer la supervision et le contrôle à distance en temps réel des équipements depuis des postes centralisés. Les données collectées en continu par les capteurs pourront être analysées pour détecter précocement les défaillances et ainsi planifier une maintenance prédictive des machines. L'exploitation des masses de données industrielles (Big Data) par des algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique permettra également d'optimiser les processus, d'améliorer la qualité et d'identifier de nouveaux leviers d'efficacité.

Pour tirer pleinement parti des bénéfices de l'IIoT, l'adoption généralisée des technologies de communication sans fil est cruciale. Elles offrent une plus grande souplesse, une mise en œuvre simplifiée et des coûts réduits comparés aux réseaux filaires

traditionnels. Le déploiement massif de capteurs et dispositifs communicants sans fil permettra d'étendre la connectivité IIoT à l'ensemble des machines et composants, même dans les environnements difficiles d'accès [1]

2.1.Topologie des réseaux IIoT :

+ La topologie en étoile :

- il y a un nœud central appelé coordinateur PAN . C'est lui qui gère le réseau.
- Les autres nœuds du réseau doivent se trouver à portée du coordinateur PAN pour pouvoir communiquer directement avec lui. Ils ne peuvent pas dialoguer directement entre eux.
- Cette topologie simple impose que tous les nœuds soient à portée radio du coordinateur central. Elle est facile à gérer mais limite la taille du réseau.

+ La topologie point à point :

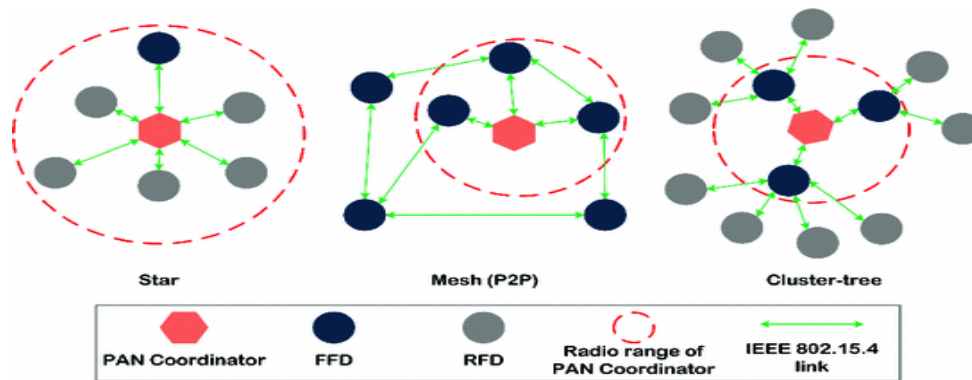
- Chaque point pourra parler à n'importe quel autre point dans le réseau à l'aide des points intermédiaires appelés Coordinateurs. Ces Coordinateurs sont sollicités pour transmettre les informations aux destinations.
- Cette topologie rend possible la création de réseaux plus étendus

+ La topologie cluster-tree:

Une version spécifique de la topologie point à point. La seule différence est que dans cette configuration, le réseau est organisé en une hiérarchie avec un PAN coordinateur qui est le coordinateur principal qui supervise des coordinateurs de groupes.

Chaque coordinateur de groupe gère les nœuds qui lui sont rattachés : les nœuds de capteurs et de terminaux qui ne peuvent communiquer qu'avec lui. [2]

Figure N°1 : Topologies supportées dans IEEE 802.15.4



[IEEE 802.15.4 Technologies for Smart Grids | SpringerLink](#)

2.2. Contraintes des réseaux IIoT :

Bien que l'IIoT partage certains points communs avec d'autres applications de l'IoT pour les particuliers ou la maison connectée, il existe des différences fondamentales à bien avoir en tête.

Tout d'abord, l'échelle et la complexité sont incomparables dans le monde industriel.

On parle de systèmes immenses avec des centaines voire des milliers d'équipements, capteurs, machines interconnectées. Il faut pouvoir traiter des volumes de données gigantesques en temps réel, avec une fiabilité à toute épreuve, même dans des environnements hostiles comme une usine. Bien loin de la simple prise intelligente pour la maison.

Ensuite, les priorités sont vraiment différentes. L'IIoT, c'est avant tout pour optimiser les processus de production, gagner en efficacité opérationnelle, augmenter la productivité des sites industriels. Pas du tout pour le confort ou le divertissement du consommateur comme pour l'IoT grand public.

Un autre point clé, c'est l'interopérabilité et la standardisation des protocoles et technologies utilisées. Dans l'industrie, il est vital que tous les équipements, systèmes et logiciels

puissent communiquer entre eux sans problème selon des normes communes. Ce n'est pas toujours une priorité pour l'IoT grand public.

Donc, la sécurité et la confidentialité des données sont absolument primordiales pour l'IIoT, beaucoup plus que pour les objets connectés grand public. On parle ici de systèmes critiques avec des enjeux énormes en termes de sûreté, de sécurité et de respect des réglementations strictes du secteur industriel. Une faille de sécurité n'aurait pas du tout les mêmes conséquences que pour un objet connecté chez soi. [3]

3. Les technologies de communication des réseaux IIoT :

De nombreuses normes ont été développées pour répondre aux exigences spécifiques des réseaux sans fil, notamment pour les capteurs et les applications IoT.

Parmi ces normes, on peut citer :

✚ **IEEE 802.11** : norme largement utilisée pour les réseaux sans fil, mais généralement trop gourmande en énergie pour les applications à faible consommation.

✚ **IEEE 802.15.1** : norme populaire pour les communications sans fil à courte portée, mais limitée en termes de débit de nombre de nœuds.

✚ **IEEE 802.15.4** : norme conçue spécifiquement pour les réseaux filaires à faible débit, à faible consommation et à faible coût, idéale pour les applications IoT.

4. Les méthodes fondamentales d'accès au canal de communication partagé [4] :

Dans un réseau local, plusieurs stations partagent un même canal de communication. Pour éviter les collisions lorsque plusieurs stations émettent en même temps, des méthodes d'accès au canal ont été développées. Ces méthodes définissent les règles que les stations doivent suivre pour accéder au canal de manière ordonnée et efficace.

Le system ALOHA : C'est l'un des premiers protocoles d'accès pour les transmissions de données sans fil, on trouve deux version de ce système :

❖ ALOHA pur :

- Les émetteurs envoient les données sur le support de manière continue.
- Il n'y a pas de synchronisation entre les émetteurs.
- Si deux émetteurs envoient en même temps, il y a collision et perte des données.

❖ ALOHA discrétisé :

- Le temps est divisé en créneaux discrets appelés "slots".

- Les émetteurs doivent attendre le début du prochain slot pour émettre toute nouvelle donnée.
- Cela réduit les risques de collision entre paquets.

le protocole **ALOHA** discrétisé ne permet pas de régler complètement le problème de collision car, si deux émetteurs ou plus choisissent le même slot pour transmettre leurs données, alors il y a toujours collision entre ces données, des protocoles plus évolués comme CSMA ont été développés par la suite pour traiter cette problématique.

❖ CSMA :

Pour résoudre le problème de collision, les chercheurs ont proposé une nouvelle approche : le **CSMA** (Carrier Sense Multiple Access). L'idée est qu'une machine écoute le support pour détecter s'il est utilisé avant la transmission. Si le support est libre, la transmission peut commencer. Sinon, la machine attend un instant aléatoire avant de réécouter le support. Différentes optimisations comme CSMA/CD et CSMA/CA ont ensuite amélioré le protocole initial

❖ CSMA/CD :

- la technique d'accès CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) est principalement associée aux réseaux câblés, tels que les réseaux Ethernet.
- Elle permet de détecter les collisions de données et de les gérer en conséquence.

❖ CSMA/CA :

- La technique d'accès CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) est utilisée dans les réseaux sans fil, tels que les réseaux Wi-Fi.
- Elle est utilisée pour réguler l'accès au support partagé afin d'éviter les collisions de données.

5. IEEE 802.15.4 :

La norme IEEE 802.15.4 a été conçue pour des petits appareils fonctionnant sur batterie qui s'échangent peu de données, comme les capteurs par exemple.

Elle est donc adaptée aux objets connectés qui doivent durer longtemps sans être rechargés.

Cette norme définit les caractéristiques techniques des communications sans fil à faible consommation d'énergie.

Elle décrit comment les informations sont échangées entre les appareils.

5.1 Les fonctionnalités de la couche physique dans IEEE 802.15.4 [2]:

- Permet de gérer l'état du module radio, qui peut se trouver dans trois modes : réception, émission ou éteint. Cela permet de contrôler le fonctionnement radio et d'optimiser la consommation énergétique.
- Intègre également la fonctionnalité de détection d'énergie sur le support radio, ce qui permet de mesurer le niveau de puissance du signal reçu.
- Des informations sur la qualité de la liaison radio
- Un mécanisme d'évaluation de canal libre est mis en œuvre pour détecter si le support est occupé ou non avant d'émettre une trame
- La sélection du support de transmission parmi les différents supports disponibles

5.2 Couche PHY :

Le standard IEEE 802.15.4 présente quatre couches physiques différentes, chacune exploitant diverses techniques de modulation, d'étalement de spectre et de fréquences, comme décrit dans le tableau ci-dessus :

Tableau N°1 : Différentes couches PHY

La bande de fréquence	La couche physique	
	Technique d'étalement de spectre	Modulation
868/915 MHz	DSSS	BPSK/ASK
	DSSS	BPSK
	PSSS	BPSK
2450MHz	DSSS	O-QPSK

Abdeddaim, M. N. (2012). "Analyse des performances d'un réseau de capteurs exploitant le standard IEEE 802.15.4." Thèse de doctorat, Université de Grenoble. Français. NNT: 2012GRENM067. HAL Id: tel-00767883

5.3 Sous-couche MAC :

La sous-couche MAC est une partie importante de la couche liaison de données dans l'architecture d'un réseau informatique.

Elle joue un rôle important dans la gestion de l'accès aux supports de communication, qu'il s'agisse d'un support physique comme un câble Ethernet ou d'un support sans fil comme les ondes radio. Ces caractéristiques principales sont :

- **Contrôle d'accès aux médias** : La sous-couche MAC contrôle les communications pour éviter les collisions qui se produisent lorsque deux stations tentent de transmettre des données simultanément sur le même support, provoquant une perte d'informations.
- **Gestion des adresses MAC** : chaque appareil connecté au réseau possède une adresse MAC (Media Access Control) unique qui est utilisée par la sous-couche MAC pour identifier la station et acheminer les données vers la destination correcte. [4]

6. Amélioration de l'IEEE 802.15.4 : IEEE 802.15.4e :[5]

La norme IEEE 802.15.4e apporte plusieurs améliorations fonctionnelles par rapport au standard IEEE 802.15.4 :

+ Accès multicanal :

La norme IEEE 802.15.4e autorise les nœuds du réseau à communiquer en utilisant plusieurs bandes de fréquences (canaux) en même temps.

Cela permet de répartir le trafic sur ces différents canaux disponibles et ainsi de réduire les risques d'interférences entre les nœuds.

Résultat : de meilleures performances globales du réseau (débit, fiabilité...).

+ Faible latence et faible consommation :

La latence correspond au délai nécessaire pour transférer les données entre deux nœuds.

La nouvelle norme réduit ce délai de communication, ce qui est essentiel pour les applications critiques.

Et ce avec toujours un souci d'efficacité énergétique pour préserver l'autonomie des nœuds.

+ Balises améliorées (Enhanced Beacons):

Les balises servent à la synchronisation des nœuds entre eux.

La nouvelle version des balises est plus évolutive et flexible dans la norme 802.15.4e.

Elle permet d'intégrer plus d'informations utiles pour gérer le fonctionnement du réseau.

+ Association rapide :

L'association est la connexion d'un nœud au coordinateur du réseau. Le processus d'association a été accéléré dans la norme 802.15.4e.

Un nœud peut désormais rejoindre et s'intégrer au réseau beaucoup plus rapidement.

5.1. Les modes qui ont été introduit dans le standard IEEE 802.15.4e :

+ TSCH – TimeSlotted Channel Hopping :

- Accès déterministe au support
- Sauts de fréquence, Très haute fiabilité

+ DSME - Deterministic & Synchronous Multi-channel Extension :

- Basé sur le mode beacon du 802.15.4 d'origine
- Ajoute l'utilisation de canaux multiples durant la période réservée (CFP)

+ LLDN :

- Low Latency Deterministic Network
- Accès synchrone garanti avec topologie maillée fixe et Latences très faibles

+ TSMP:

- Time Synchronized Mesh Protocol

Protocole maillé avec synchronisation temporelle et Très basse sur la consommation énergétique

+ BLINK - Radio Frequency Identification Blink:

- Pour les applications d'identification et de localisation d'objets ou de personnes

7. Le mode TSCH de l'IEEE 802.15.4e :[5]

C'est une méthode d'accès au support de communication pour les réseaux à faible consommation d'énergie avec un délai limité tel que les réseaux de capteur sans fil, dans ce mode :

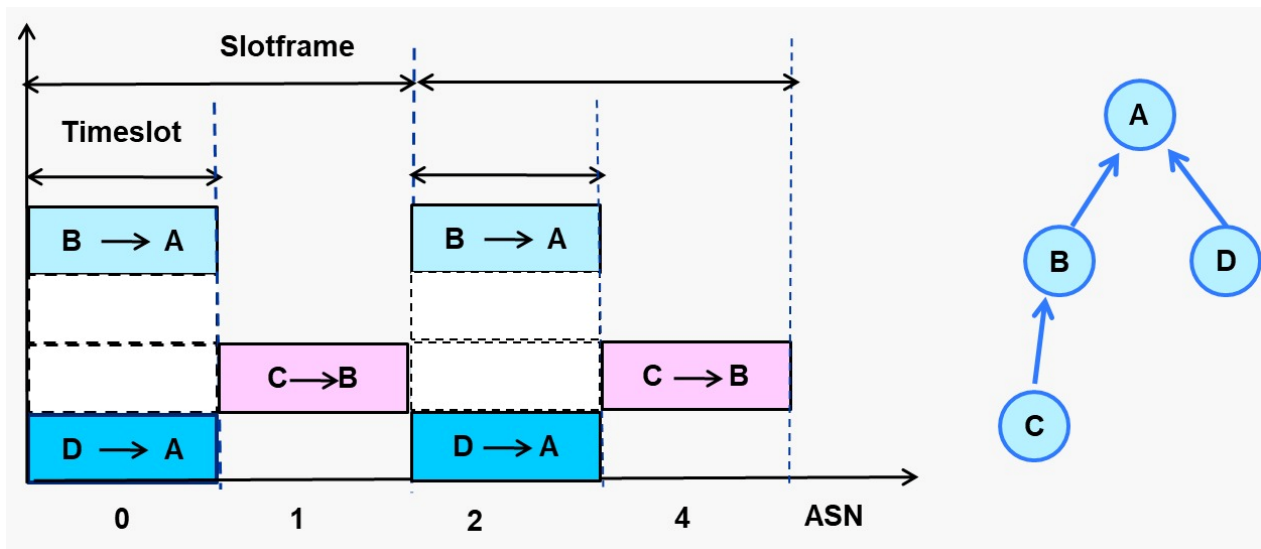
La division de temps en intervalles appelées « timeslots (Les intervalles de temps Permet la transmission et la réception de l'accusée de réception)

Plusieurs slots consécutifs constituent d'une trame de créneaux (slotframe) qui se répète périodiquement. Afin d'augmenter la capacité du réseau

Chaque case d'un slotframe est donc identifiée par un numéro de slot et un numéro de canal (slot offset et channel offset).

Plusieurs nœuds du réseau peuvent transmettre des données en même temps sur le même slot, mais en utilisant des canaux radio différents (0-15)

Figure N°2 : le mode TSCH



Conclusion

Ce chapitre a examiné le contexte technique et les fondamentaux du réseau IEEE 802.15.4e et plus particulièrement son mode TSCH, une solution adaptée aux besoins de l'IoT et de l'IIoT.

- Les principaux éléments abordés sont : Norme de réseau sans fil IEEE axée sur IEEE 802.15.4 et son amendement IEEE 802.15.4e.
- Présentation du mode TSCH essentiel pour 6TiSCH.
- Divers aspects de la norme IEEE 802.15.4 : couche physique, mode de sous-couche MAC, types de nœuds et topologie.

Chapitre 2 : Etat de l'art

1. Introduction :

La technologie 6TiSCH (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) est une solution de communication sans fil conçue spécifiquement pour les réseaux industriels et les applications IoT (Internet of Things). 6TiSCH a été l'un des principaux efforts pour apporter IPv6 aux réseaux industriels sans fil à faible consommation, établissant un pont entre les réseaux Time Slotted Channel Hopping (TSCH) et les réseaux 6LoWPAN. Elle repose sur le standard IEEE 802.15.4e, qui définit les spécifications pour le mode de planification temporelle coordonnée (TSCH). Le protocole 6TiSCH apporte des améliorations significatives en termes de fiabilité, de déterminisme et d'efficacité énergétique par rapport aux protocoles de communication sans fil traditionnels. L'un des aspects clés de 6TiSCH est son algorithme d'ordonnancement, qui joue un rôle crucial dans la gestion des ressources radio et l'optimisation des performances du réseau. Dans ce chapitre, nous explorerons en détail la technologie 6TiSCH ainsi que les différents algorithmes d'ordonnancement les plus utilisés pour planifier les transmissions dans ce contexte

2. Architecture 6TiSCH :

Le groupe de travail IETF IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e (6TiSCH) a normalisé un ensemble de protocoles permettant la mise en place de réseaux IPv6 à faible puissance qui répondent aux exigences des systèmes industriels [6].

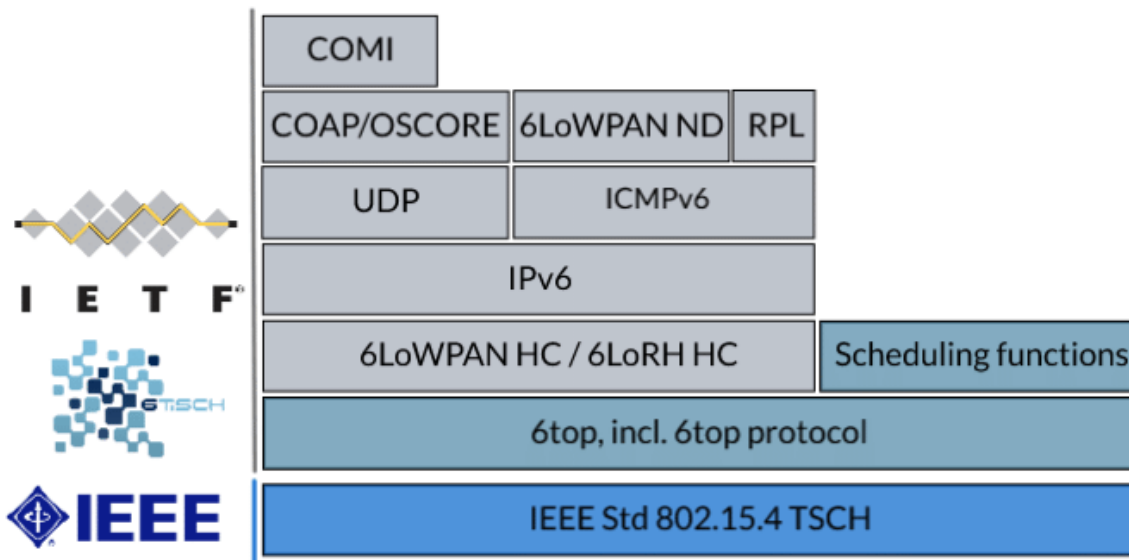
L'architecture 6TiSCH est donc dédiée à l'intégration des réseaux sans fil basés sur la norme IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) avec l'infrastructure IPv6 et représente une avancée majeure dans le domaine des réseaux sans fil. Au cœur de cette architecture se trouve la gestion de la couche MAC (Medium Access Control) via TSCH, qui permet une communication sans fil fiable et économe en énergie en divisant le temps en intervalles (time slot) pour la transmission de paquets.

Pour s'adapter à l'environnement IPv6, 6TiSCH intègre plusieurs protocoles essentiels. 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) est responsable de l'encapsulation des datagrammes IPv6 dans des trames TSCH, permettant ainsi

la communication avec les nœuds du réseau. Le protocole de routage IPv6 pour les réseaux de faible puissance et à perte (RPL) organise quant à lui les nœuds dans une structure de graphe acyclique dirigé vers la destination (DODAG), facilitant ainsi la transmission de données à plusieurs sauts.

L'architecture 6TiSCH est illustrée par la figure 3.

Figure N°3 : la pile de protocoles pour les réseaux 6TiSCH



3. Le protocole de routage RPL :

Le protocole de routage RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) est un protocole de routage conçu spécifiquement pour les réseaux à faible puissance et fort taux de perte, tels que les réseaux de capteurs sans fil et l'internet des objets. Il est adapté aux systèmes à ressources limitées et qui présentent certaine hétérogénéité.

Fonctionnement du Protocole RPL

✚ Construction du DODAG:

Le protocole RPL construit un graphe acyclique orienté et dirigé vers une destination, appelé DODAG (Destination-Oriented Directed Acyclic Graph). Ce graphe est utilisé pour représenter la topologie du réseau.

Les nœuds du réseau sont organisés en un arbre avec un nœud racine, appelé le puits (root node). Les nœuds sont classés en fonction de leur distance virtuelle par rapport au puits.

✚ Mécanismes de Routage:

Le protocole RPL utilise des métriques de routage pour gérer la mobilité des nœuds et s'adapter aux limitations de stockage et de calcul. Les métriques de routage sont utilisées pour optimiser la position des nœuds dans le DODAG en calculant leur rang par rapport à leurs parents.

Les nœuds émettent des messages de contrôle pour découvrir les routes et maintenir la topologie du réseau. Les messages de contrôle utilisés dans la phase de découverte de routes sont :

- ❖ DIO (DODAG Information Object) : un message utilisé pour initier la découverte de routes.
- ❖ DCO (DODAG Configuration Option) : un message utilisé pour configurer les paramètres de routage.
- ❖ DAO (DODAG Advertisement Object) : un message utilisé pour annoncer les routes disponibles.

Gestion de la Mobilité:

Le déplacement des nœuds peut entraîner des modifications dans les routes du DODAG. Le protocole RPL utilise des métriques de routage pour gérer cette mobilité et assurer la qualité de service (QoS) dans les applications de collecte de données.

Les métriques de routage utilisées incluent l'ETX (Expected Transmission Count) et l'énergie consommée. Une métrique de routage combinant ces deux métriques a été proposée pour améliorer les performances du protocole

4. La couche 6TiSCH :

6TiSCH a défini les protocoles manquants du plan de contrôle pour faire correspondre les ressources de la couche liaison aux besoins de la topologie de routage et de la communication applicative [6]. La sous-couche opérationnelle 6TiSCH (6top) assure l'abstraction du lien IP sur TSCH et gère l'allocation des cellules pour répondre aux besoins de l'application alors que des fonctions d'ordonnancement devront implémenter des stratégies de planification pour l'allocation et l'attribution des time slots.

Pour une gestion efficace de la planification, des composants tels que la fonction de planification (SF) et le protocole 6P de la sous-couche 6top sont inclus dans la couche 6TiSCH, permettant ainsi le calcul et la négociation des cellules nécessaires à la communication entre les nœuds du réseau.

Dans l'ensemble, l'architecture 6TiSCH offre une solution complète et intégrée pour les réseaux sans fil, garantissant une communication fiable, efficace et économe en énergie dans divers environnements industriels et autres environnements exigeants. [7]

5. La sous-couche opérationnelle 6TiSCH (6top) :

La sous-couche 6top et son protocole 6P spécifie les opérations et les messages nécessaires pour réaliser une négociation complète entre deux nœuds (transaction 6P).

Protocole 6p :

6p est un protocole de signalisation de la couche 6top qui définit les messages ainsi que les mécanismes de transaction pour ajouter, supprimer pour réallouer des cellules dans une slot frame. Il est néanmoins important de noter que la décision de quand, comment et combien de cellules seront allouées ou supprimer est une prérogative des fonctions d'ordonnement.

Une transaction 6P se compose d'une demande suivie d'une réponse. Le message de demande contient un code pour spécifier l'action souhaitée, à savoir ADD (pour demander une nouvelle allocation), DELETE (pour annuler une allocation existante) ou CLEAR (pour réinitialiser la négociation en cours). De même, le message de réponse comprend un code SUCCÈS ou ERREUR, pour notifier respectivement une transaction réussie ou échouée.

En général, un nœud demandeur (nœud A) envoie une requête ADD au nœud correspondant (nœud B), spécifiant le nombre de cellules à allouer et une liste de cellules libres, et le nœud B répond par une réponse SUCCESS contenant la liste des cellules allouées. Cependant, une transaction peut échouer, par exemple lorsque le nœud B ne peut pas répondre à la demande. En cas de perte ou de corruption d'un message de requête/réponse, le message de requête est retransmis après un délai d'attente prédéfini (timeout 6P). Enfin, si une incohérence est détectée par le nœud B (par exemple, en raison d'un message de réponse perdu), il répond par un message ERREUR qui force le nœud A à envoyer un message CLEAR et à réinitialiser la planification (Les deux nœuds annulent toutes les cellules allouées). Ensuite, le nœud A doit recommencer le processus d'allocation.[7]

6. Fonction d'ordonnement :

La couche 6TiSCH délègue les décisions d'ordonnement concernant le moment et le nombre de cellules à allouer à une fonction d'ordonnement. Le groupe de travail 6TiSCH a par ailleurs standardisé une fonction d'ordonnement générique appelée Minimal Scheduling fonction dont nous détaillerons le fonctionnement dans la section réservée aux algorithmes d'ordonnement hybrides.

7. Ordonnancement dans les réseaux 802.15.4e TSCH :

Les enjeux liés à l'ordonnancement ont été mis en avant dans la recherche portant sur les réseaux TDMA. Cependant, la plupart des systèmes de planification multicanaux actuels ne sont pas appropriés pour les réseaux TSCH. Ils ne sont pas adaptés aux nœuds ayant des capacités limitées, ne permettent pas de changements de canal par paquet, et présentent une efficacité limitée en termes d'utilisation des canaux. Dans le mode TSCH de la norme IEEE 802.15.4-2015, les couches supérieures ont la possibilité de définir des plages de temps que tous les nœuds doivent respecter. Cela autorise la communication entre les nœuds sur plusieurs canaux (saut de canal), ce qui facilite et accélère le flux d'informations de la source au point de collecte. Les nœuds mettent en place une planification à la fois globale et locale en allouant des créneaux temporels aux flux respectifs pour favoriser le partage de cellules entre les clients. [2].

La planification peut être divisée en centralisée, distribuée et autonome (ou statique), Il existe également des solutions hybrides qui combinent certaines des approches précédentes

7.1. Ordonnancement centralisé :

L'ordonnancement centralisée repose sur une entité centrale, souvent désignée sous le nom d'élément de coordination de point (PCE), qui collecte des données sur la topologie du réseau et les schémas de trafic. À partir de ces informations, le PCE élabore un calendrier de communication optimisé pour l'ensemble du réseau. Bien que ces systèmes de planification offrent généralement une efficacité maximale, ils présentent certains inconvénients. Premièrement, ils entraînent une charge de communication élevée car la collecte et le traitement des informations exigent des échanges de données fréquents entre les nœuds et l'entité centrale.

De plus, leur inflexibilité les rend peu adaptés aux environnements où les conditions de trafic et de réseau évoluent, limitant ainsi leur pertinence pour les réseaux étendus ou dynamiques. Parmi les algorithmes proposés dans cette catégorie, nous pouvons citer TASA [9] et MODESA [10].

+ TASA :

Les auteurs de [11] ont présenté le TASA (Traffic Aware Scheduling Algorithm), une méthode centralisée où un seul nœud construit le plan. Ce plan élabore un modèle temps/fréquence

en se basant sur la topologie du réseau et la charge de trafic de chaque nœud, ce qui permet de réduire le délai et le cycle de service radio.

MODESA :

Dans une autre approche centralisée de diffusion de données brutes par fusion (convergecast), les auteurs de [12] ont introduit le MODESA (Multichannel Optimized Delay Time Slot Assignment). Cette méthode prend en considération la disponibilité de plusieurs canaux pour réduire le temps de cycle TDMA. Les nœuds sont triés selon leur priorité, la priorité la plus élevée correspondant au plus grand nombre de paquets de données restant dans la mémoire tampon du nœud.

6.2. Ordonnancement distribué :

Dans le contexte de la planification distribuée, les nœuds s'engagent dans des négociations avec leurs voisins pour déterminer l'allocation des cellules TSCH, utilisant le protocole 6P. Ils adaptent ensuite le nombre de cellules attribuées en fonction du trafic et des conditions changeantes du

Réseau. Bien que cette méthode puisse ne pas aboutir à une planification optimale des communications, elle demeure particulièrement bien adaptée aux réseaux de grande taille

Ou à ceux caractérisés par une dynamique constante.

OTF [1] est un des algorithmes d'ordonnancement distribués considéré par le groupe de travail 6Tisch comme candidat pour la standardisation d'un algorithme d'ordonnancement de référence. Ce choix n'a finalement pas été retenu comme cela est évoqué ci-après.

L'algorithme d'ordonnancement OTF a été initialement considéré par le groupe de travail 6TISCH comme une SF de référence pour la normalisation. Cependant, OTF présente quelques lacunes, notamment dans son estimation du nombre de cellules nécessaires

Par application et dans sa capacité à gérer efficacement la congestion, notamment lors de changements dans le nœud parent préféré.

Ces limitations ont été surmontées par l'algorithme EOTF(Enhanced On-The-Fly), une version améliorée d'OTF, offrant ainsi des solutions plus robustes et mieux adaptées aux exigences des réseaux modernes.

Description d'OTF :

L'algorithme de réservation de bande passante On-The-Fly (OTF) est une approche utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil pour attribuer de manière dynamique la bande passante nécessaire aux transmissions de données. Contrairement aux méthodes statiques de réservation de bande passante, l'OTF permet aux nœuds du réseau de réserver la bande

passante au fur et à mesure des besoins, en fonction de la demande de trafic et des conditions du réseau en temps réel.

Son principe central est d'optimiser l'utilisation des ressources radio disponibles tout en minimisant les retards de transmission et en garantissant la fiabilité des communications, surtout dans les applications critiques où la latence et la fiabilité sont essentielles.

Dans l'algorithme OTF, les nœuds du réseau interagissent pour négocier et réserver la bande passante requise pour leurs transmissions de données. Cette négociation peut se dérouler de manière distribuée, où chaque nœud prend des décisions en se basant sur des informations locales et des échanges avec ses voisins, ou de manière centralisée, avec un contrôleur central coordonnant les réservations de bande passante pour l'ensemble du réseau.

L'OTF permet une gestion efficace des ressources radio en tenant compte des variations dynamiques du trafic et des conditions du réseau, ce qui peut améliorer les performances globales du réseau en termes de délais de transmission, de taux de réussite des transmissions et de capacité de charge. Cependant, comme toute méthode dynamique, l'OTF peut présenter des défis liés à la complexité de sa mise en œuvre et à la gestion des conflits de réservation de bande passante dans des environnements réseau changeants.

7.3. Ordonnement autonome :

Une approche de planification autonome a été développée, où les nœuds allouent les cellules de manière indépendante, sans négociation, en utilisant une fonction de hachage appliquée aux adresses des nœuds. Parmi les solutions d'ordonnement proposées dans cette catégorie Orchestra [13] et ALICE [14].

✚ Orchestra :

Orchestra [13] utilise cette approche en offrant deux modes d'allocation différents : un mode basé sur le récepteur et un autre mode basé sur l'expéditeur. Dans le premier mode, chaque nœud attribue une cellule par slotframe pour recevoir les paquets de tous ses voisins, tandis que dans le second, chaque nœud dispose d'une seule cellule par slotframe pour envoyer des paquets à tous ses voisins. Actuellement, Orchestra est le l'algorithme d'ordonnement par défaut utilisé dans le système d'exploitation Contiki NG. On va plus d'taillé sur ça dans chapitre 3

✚ ALICE :

ALICE (Autonomous Link-based Cell Scheduling) remplace le schéma d'allocation basé sur les nœuds utilisé dans Orchestra par un schéma basé sur les liens, où chaque nœud alloue une cellule par slotframe pour chaque lien unidirectionnel.

Fonction d'ordonnement ALICE :[14]

ALICE a été conçu pour améliorer les performances d'Orchestra, surtout dans les réseaux étendus ou denses. Contrairement à Orchestra, ALICE adopte un schéma d'allocation basé sur les liens, où chaque nœud alloue une seule cellule par slotframe pour chaque liaison directionnelle dans laquelle il est impliqué. Plus spécifiquement, chaque nœud générique attribue une cellule de réception pour chacun de ses nœuds enfants, ainsi qu'une cellule supplémentaire pour les transmissions vers son nœud parent. Cette approche permet à ALICE d'attribuer davantage de cellules par slotframe qu'Orchestra, améliorant ainsi la fiabilité et la latence de bout en bout, particulièrement lorsque le débit de trafic dépasse un certain seuil.

Dans ALICE, chaque nœud effectue l'allocation de manière autonome en calculant l'intervalle de temps et le décalage de canal correspondants dans le slotframe bidimensionnel à l'aide d'une fonction de hachage comprenant plusieurs paramètres : l'identifiant du nœud lui-même et de ses nœuds parents/enfants, la direction du lien de communication (en amont ou en aval), et la longueur de la trame de créneau.

Étant donné que l'allocation basée sur le hachage peut entraîner des collisions, c'est-à-dire que la même cellule est utilisée par différents nœuds, l'allocation est recalculée par chaque nœud à chaque slotframe, réduisant ainsi les effets négatifs des collisions. Des études ont montré que la réallocation des cellules améliore les performances par rapport au comportement le plus défavorable, tandis que son impact sur les performances moyennes est négligeable. ALICE, en attribuant plus de cellules par slotframe qu'Orchestra, présente des performances améliorées en termes de taux de livraison des paquets et de latence dans la plupart des scénarios. Cependant, la planification autonome est intrinsèquement statique et incapable de gérer les changements inattendus des conditions de circulation. Pour remédier à cette limitation, de nouveaux schedulers hybrides ont été proposés alliant à la fois autonomie et adaptabilité. Parmi ces scheduler, nous allons nous pencher sur le fonctionnement de TESLA.

les principales différences entre Orchestra et ALICE :

Orchestra :

- Utilise une allocation de cellules basée sur les nœuds
- Deux modes d'allocation : basé sur le récepteur ou l'émetteur

- Dans le mode récepteur, chaque nœud a une cellule pour recevoir de tous ses voisins
- Dans le mode émetteur, chaque nœud a une cellule pour transmettre à tous ses voisins

ALICE (Autonomous Link-based Cell Scheduling) :

- Utilise une allocation de cellules basée sur les liens
- Chaque nœud alloue une cellule par lien unidirectionnel
- Chaque nœud alloue une cellule de réception pour chacun de ses nœuds enfants
- Et une cellule supplémentaire pour transmettre vers son nœud parent
- L'allocation se fait de manière autonome via une fonction de hachage
- Réallocation à chaque slotframe pour limiter les collisions
- Permet d'allouer plus de cellules par slotframe qu'Orchestra

7.4 Ordonnancement hybride :

La planification autonome est incapable de gérer les changements inattendus des conditions de trafic. Pour remédier à cette limitation, de nouveaux schedulers hybrides ont été proposés. Afin de permettre à ALICE de s'adapter aux fluctuations du trafic, les auteurs [15] ont exploité le mécanisme "Frame Pending" (FP) fourni par le protocole TSCH sous-jacent. Ce mécanisme permet au nœud émetteur de signaler qu'il a encore d'autres données à envoyer. Grâce à ce mécanisme simple, un nœud peut transmettre plus de paquets que le nombre de cellules initialement programmées, faisant ainsi face à des pics de trafic temporaires. Ces cellules supplémentaires sont obtenues sans nécessiter de négociation ni de surcharge supplémentaire, le bit FP étant simplement superposé dans la trame TSCH.

TESLA :

TESLA propose que chaque nœud surveille sa charge de trafic et ajuste la taille du slotframe en fonction du débit de trafic. Cette adaptation s'accompagne d'un coût supplémentaire lié aux informations de contrôle à échanger, telles que la nouvelle taille de slotframe dans TESLA

. Ces dernières années, les approches distribuées et autonomes ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté de recherche. Fondamentalement, la planification autonome vise à réduire les frais de contrôle, tandis que la planification distribuée permet de s'adapter aux changements de trafic. Enfin, les approches hybrides cherchent à combiner le meilleur des deux mondes. Bien que de nombreuses évaluations de performances aient été réalisées, ces études comparent généralement des solutions similaires, laissant une lacune en termes de comparaison directe entre les approches distribuées et autonomes, en mettant l'accent

sur leurs avantages et inconvénients respectifs. Dans ce qui suit, nous présentons une brève présentation des deux SF, EOTF en tant que SF entièrement distribué et MSF en tant que SF hybride

L EOTF : [16]

Contrairement à ALICE, EOTF adopte une approche entièrement distribuée pour l'allocation de cellules, en se reposant sur le protocole 6P pour la négociation de voisin à voisin. En substance, pour chaque paire de nœuds impliqués dans une relation parent-enfant, EOTF surveille le trafic (généralisé et transféré localement) vers le nœud parent et estime le nombre de cellules nécessaires pour le gérer. En conséquence, il détermine le nombre de cellules à ajouter ou à supprimer à l'allocation actuelle et active le protocole 6P pour allouer ou désallouer des cellules en conséquence. Afin de limiter les changements fréquents d'allocation et de désallocation de cellules, l'algorithme intègre un mécanisme d'hystérésis, ce qui conduit souvent à un sur provisionnement.

Cependant, baser l'estimation du nombre de cellules uniquement sur le trafic observé, sans prendre en compte d'autres facteurs tels que les fluctuations de la qualité des liaisons, les échecs des transactions 6P, les déconnexions temporaires ou les changements du parent préféré, peut entraîner une sous-estimation significative du nombre de cellules nécessaires, entraînant ainsi une dégradation des performances. Pour éviter cette sous-estimation, EOTF prend explicitement en compte le nombre attendu de transmissions de la liaison lors du calcul du nombre requis de cellules. De plus, EOTF introduit un mécanisme de gestion de la congestion qui se déclenche lorsque la taille de la file d'attente locale dépasse un seuil prédéfini β . Cela permet au nœud de prévenir ou de résoudre rapidement la congestion locale.

Plus précisément, un bonus de congestion est utilisé pour sur provisionner le nœud congestionné, lui permettant de transmettre plus rapidement les paquets en attente dans la file d'attente. Enfin, EOTF surveille également l'utilisation des cellules afin de libérer les cellules excédentaires, acquises pendant une phase de congestion, si elles ne sont plus nécessaires.

8.Minimal Scheduling Function (MSF) :

le Minimal Scheduling Function (MSF) qui est le standard de l'IETF pour l'ordonnancement dans les réseaux 6TiSCH :

MSF vise à fournir une fonctionnalité d'ordonnancement minimale mais complète pour les réseaux maillés 6TiSCH contraints en ressources. Son principal objectif est de permettre à chaque nœud de maintenir un ensemble de cellules suffisantes pour ses communications, tout en minimisant la consommation d'énergie et en évitant les collisions.

Le mécanisme d'amorçage de MSF permet à un nouveau nœud de rejoindre le réseau en découvrant rapidement un voisin et en négociant une cellule dédiée pour les échanges ultérieurs. Cela évite les collisions lors de l'ajout du nouveau nœud.

Chaque nœud maintient une table de voisinage contenant les informations de programmation des cellules de ses voisins à un saut. Cette table est mise à jour par échange de messages de contrôle topologique sur les cellules autonomes partagées.

MSF combine des cellules réservées de façon autonome et négociée :

+ **Cellules autonomes** : allouées de manière déterministe par une fonction de hachage des adresses, sans négociation. Utilisées pour les messages de contrôle de base.

+ **Cellules négociées** : Allouées/libérées dynamiquement via le protocole 6P en fonction des besoins de bande passante. Utilisées pour les échanges de données.

Le protocole 6P (que nous détaillerons dans le chapitre 2) permet aux nœuds de négocier et réserver des cellules supplémentaires en diffusant des requêtes à leurs voisins. Les conflits sont résolus par tirages aléatoires.

MSF inclut également des mécanismes de maintenance proactive des cellules allouées, de gestion de la mobilité des nœuds et de support des contraintes de bout en bout pour l'ingénierie de trafic. [17]

9. Les avantages et les inconvénients :[1]

Tableau N°2 Analyse des approches d'ordonnement

Approches	Avantages	Inconvénients
Centralisé	Permet une optimisation globale des ressources, une coordination efficace et une vue d'ensemble du réseau.	Peut introduire des goulots d'étranglement, une dépendance au contrôleur central et des problèmes de scalabilité.
Distribué	Réduit la surcharge due aux transactions de contrôle, offre une certaine flexibilité et s'adapte aux changements de trafic.	Peut manquer de coordination globale et de vue d'ensemble du réseau
Autonome	Réduit les frais de contrôle, offre une certaine efficacité et peut s'adapter aux changements locaux.	Peut manquer de coordination globale et de prise de décision centralisée pour optimiser les performances globales du réseau.
Hybride	Permet une adaptation aux changements de trafic tout en réduisant les frais de contrôle	Peut nécessiter une complexité supplémentaire dans la gestion des ressources.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les différentes approches d'ordonnancement proposées pour les réseaux 6TiSCH. Nous avons pu constater une diversité d'algorithmes, allant des solutions centralisées aux approches distribuées. Chaque approche a ses propres forces et faiblesses, faisant des compromis entre l'optimalité de l'ordonnancement, la complexité informatique, la tolérance aux pannes, les considérations de qualité de service et l'adaptabilité dynamique. Cette analyse détaillée des différents algorithmes d'ordonnancement met en évidence la complexité de ce problème et la nécessité de prendre en compte les détails des applications IoT et IIoT lors de la conception d'une solution d'ordonnancement appropriée.

Chapitre 3 : Méthodologie d'évaluation des algorithmes

d'ordonnancement

1. Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est de décrire la méthodologie d'évaluation que nous allons utiliser pour analyser les algorithmes d'ordonnancement de notre étude. Nous allons principalement nous focaliser sur l'algorithme Orchestra dont nous allons détailler le fonctionnement dans ce chapitre. Nous examinerons également l'utilisation de Contiki-NG, un système d'exploitation conçu pour les dispositifs IoT, et son simulateur intégré Cooja.

Enfin, nous décrirons les critères d'évaluations pour analyser l'impact d'un algorithme d'ordonnancement sur les performances du réseau en identifiant pour cela différents scénarios proposés pour cette étude.

2.Fonctionnement d'Orchestra : [18]

Orchestra est un algorithme d'ordonnancement qui se base sur une approche où chaque nœud du réseau suit une stratégie d'allocation de cellules selon deux styles différents : la planification basée sur le récepteur et la planification basée sur l'expéditeur.

2.1 Planification basée sur le récepteur

Principe : Chaque nœud alloue une cellule par slotframe pour recevoir des paquets de tous ses voisins.

Fonctionnement :

- Chaque nœud réserve des cellules spécifiques dans le slotframe pour la Réception des données.
- Cela signifie que si un nœud a plusieurs voisins, il allouera une cellule Distincte pour chaque voisin afin de recevoir les données sans conflit.

Avantages :

- Réduction des collisions de paquets, car chaque réception est planifiée et isolée des autres.
- Amélioration de la fiabilité de la réception des données.

Exemple : Si un nœud a trois voisins (B, C, et D), il allouera trois cellules dans chaque slotframe pour recevoir des paquets de chacun de ces voisins

2.2 Planification basée sur l'expéditeur

Principe : Chaque nœud dispose d'une seule cellule par slotframe pour envoyer des paquets à tous ses voisins.

+ Fonctionnement :

- Chaque nœud utilise une cellule unique dans le slotframe pour transmettre des données à ses voisins.
- Cette cellule est partagée pour l'envoi de paquets à tous les voisins, ce qui réduit le nombre de cellules nécessaires pour les transmissions.

+ Avantages :

- Simplification de la gestion des transmissions, car un nœud n'a qu'une seule cellule à gérer pour l'envoi.
- Efficacité accrue en termes de nombre de cellules utilisées.
- Exemple : Si un nœud A doit envoyer des messages à ses voisins (B, C, et D), il utilisera une seule cellule dans chaque slotframe pour transmettre les paquets à chacun de ces voisins tour à tour.

2.3 Utilisation dans Contiki-NG :[19]

Contiki-NG est un système d'exploitation polyvalent et léger, conçu pour maximiser l'efficacité énergétique et l'utilisation des ressources dans les dispositifs IoT. Sa compatibilité avec des architectures matérielles économes en énergie et sa pile de communication IPv6 conforme aux standards font de Contiki-NG un choix privilégié pour les développeurs cherchant à connecter des dispositifs à Internet de manière fiable et efficace. La disponibilité en open source sous une licence permissive encourage l'innovation et la collaboration dans la communauté IoT.

3. Simulateur Cooja :[20]

Afin de mener nos tests de simulation, nous avons utilisé Cooja, le simulateur intégré au système d'exploitation Contiki-NG. Cooja présente les caractéristiques suivantes :

- Il combine à la fois la simulation matérielle des nœuds capteurs et la simulation des comportements de haut niveau en une seule simulation.
- Cooja est flexible et extensible, permettant de modifier ou de remplacer tous les niveaux du système.
- Étant une application Java, toutes les interactions avec le code Contiki s'effectuent via l'interface native Java (Java Native Interface ou JNI).

L'interface du simulateur Cooja se compose de plusieurs fenêtres (plugins), comme illustré sur la Figure 4

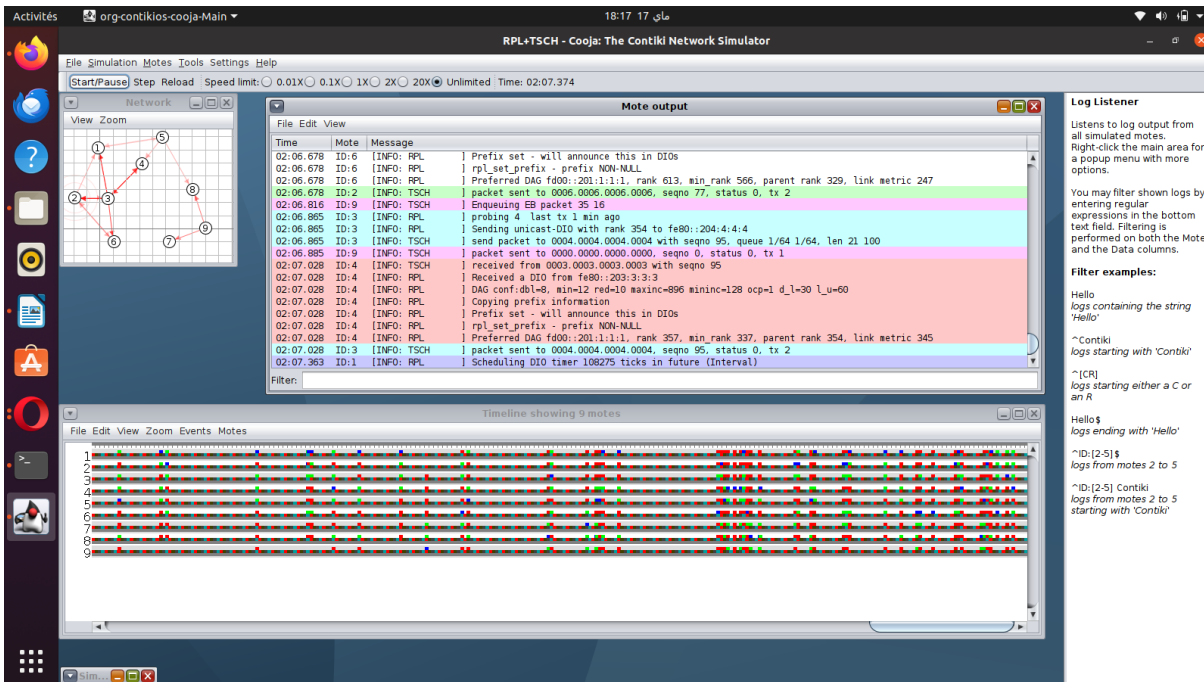


Figure 4: Interface du simulateur Cooja.

- La barre d'outils en haut : permet de contrôler la simulation (démarrer, pause, avancer pas à pas) et d'ajuster la vitesse.
- Network : présente le réseau simulé et le flux de communication durant la simulation.
- La fenêtre "Mote output" affiche les messages de journalisation (logs) générés par chaque nœud durant la simulation, avec des informations sur les paquets reçus/envoyés, la mise à jour des options de routage, etc.
- La fenêtre "Radio messages" liste tous les paquets radio échangés entre les nœuds, avec leur heure d'émission, l'émetteur, le récepteur et les données transmises.
- La fenêtre "Timeline" montre une représentation graphique de l'activité de chaque nœud au cours du temps, permettant de visualiser les périodes d'émission, de réception, etc.

4. Critères :

Un critère est un standard, une mesure ou un indicateur utilisé pour évaluer, juger ou prendre des décisions sur quelque chose. Dans le contexte des réseaux, un critère peut être une métrique spécifique utilisée pour évaluer différents aspects tels que le pourcentage de temps pendant lequel les nœuds sont actifs, le taux de livraison de paquets, le taux de perte de paquets, la qualité de service, la consommation d'énergie, la couverture du réseau, la latence, la fiabilité de la communication, etc.

5. Définitions des différents critères :[21]

5.1 Charge de la consommation énergétique :

La charge de consommation énergétique fait référence à la quantité d'énergie en milliCoulombs (mC) nécessaire au fonctionnement des différents composants d'un réseau sans fil comme les nœuds, routeurs et points d'accès. Cette charge représente le taux auquel l'énergie électrique est consommée et déchargée des batteries des dispositifs.

Le milliCoulomb est une unité de charge électrique correspondant à la quantité de charge transférée par un courant constant d'un milliampère pendant une milliseconde. C'est donc une mesure appropriée pour quantifier la consommation énergétique des composants électroniques alimentés par batterie dans un réseau sans fil.

5.2 Le PDR (Packet Delivery Ratio):[22]

Le taux de livraison des paquets est une métrique qui indique la livraison réussie des paquets de données de l'émetteur au récepteur. Il se réfère au pourcentage de paquets atteignant leur destination prévue sans erreurs ni perte.

- **Comment calculer le PDR** :

Le PDR est calculé en divisant le nombre de paquets reçus avec succès par le nombre total de paquets envoyés, puis en multipliant par 100 pour obtenir un pourcentage. Par exemple, si 90 paquets sur 100 atteignent leur destination, le taux de livraison des paquets est de 90 %.

5.3 Le duty cycle (ou cycle de service) :[21]

Le pourcentage de temps durant lequel le nœud est actif, également connu sous le nom de cycle de service, est un indicateur crucial dans les réseaux sans fil, en particulier dans le contexte de la maintenance industrielle. Ce concept fait référence à la proportion de temps pendant lequel un équipement ou un nœud est opérationnel et effectue des tâches par rapport à la durée totale de fonctionnement. Dans le domaine de la maintenance industrielle, le cycle de service est souvent utilisé pour évaluer l'efficacité des interventions et la disponibilité des équipements. Il permet de mesurer le temps pendant lequel un équipement est en service et prêt à fonctionner par rapport à sa durée totale de fonctionnement. Un cycle

de service élevé indique une utilisation efficace de l'équipement, tandis qu'un cycle de service faible peut indiquer des problèmes de disponibilité ou de maintenance

5.4 La jointure radio : [5]

Le pourcentage d'utilisation de support, également appelé taux d'utilisation, est une mesure de la capacité utilisée d'un lien réseau par rapport à sa capacité totale. Il est généralement exprimé sous forme de pourcentage. Un taux d'utilisation élevé (proche de 100%) indique que le lien est très chargé et proche de la saturation. Cela peut entraîner une congestion du réseau et une augmentation de la latence et de la perte de paquets.

5.5 Le taux d'accusés de réception des paquets

Le taux d'acquittement des paquets représente le pourcentage de paquets correctement reçus et confirmés sur le total des paquets envoyés. C'est une mesure clé pour évaluer la qualité d'une liaison de communication dans les réseaux sans fil de capteurs et autres systèmes. Un taux élevé indique une bonne réception des données avec peu de pertes, tandis qu'un faible taux révèle des problèmes potentiels comme des interférences ou des erreurs de transmission.

5.6 RPL switching :

Dans un réseau RPL, chaque nœud sélectionne un parent qui sera son prochain saut vers la racine du réseau. Les commutations de parent RPL surviennent lorsqu'un nœud décide de changer de nœud parent. Ce changement peut être provoqué par plusieurs raisons :

1. Dégradation du lien avec le parent actuel : Si la qualité du lien sans fil entre le nœud et son parent actuel se dégrade, cela peut entraîner des pertes de paquets, des retransmissions et une consommation d'énergie plus élevée. Dans ce cas, changer pour un parent offrant un meilleur lien peut s'avérer plus efficace.
2. Découverte d'un parent plus performant : Périodiquement, les nœuds RPL diffusent des messages de contrôle contenant des métriques de routage comme le nombre de sauts jusqu'à la racine, l'état des liens, etc. Si un nœud détecte un nouveau voisin offrant un chemin plus direct/stable/énergétiquement efficace vers la racine, il peut décider de changer de parent.

6. Scénarios d'évaluation :

Afin d'évaluation l'impact de l'ordonnanceur Orchestra sur le réseau, nous avons considéré la variation du nombre de nœuds comme scénarios d'évaluation.

Dans ce scénario, on va considérer 3 topologies réseaux différentes :

1. la topologie 1 qui contient 5 nœuds
2. la topologie 2 qui contient 10 nœuds
3. la topologie 3 qui contient 20 nœuds

Ces trois topologies, permettront d'évaluer les performances de l'algorithme d'ordonnement Orchestra sur la base des critères d'évaluation préalablement définis à l'aide de plusieurs simulations réalisées dans Cooja.

Les résultats obtenus seront détaillés dans le chapitre suivant. En analysant ces résultats pour chaque topologie, nous serons en mesure d'évaluer leur efficacité respective en termes de PDR et de cycle de jointure radio et d'autres critères.

Remarque :

Un nœud c'est un nœud simulé qui représente un périphérique matériel de type capteur

Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre le fonctionnement d'Orchestra, un ordonnanceur proposé pour les réseaux 6TiSCH ainsi que l'utilisation de Contiki-NG, un système d'exploitation optimisé pour les dispositifs IoT et son simulateur intégré Cooja. Ce dernier nous permettra de simuler les différentes topologies réseaux et de comparer leurs performances en fonction de plusieurs critères. Dans le chapitre suivant, nous présenterons et analyserons les résultats obtenus à partir de ces simulations.

Chapitre 4 : Résultats

1. Introduction :

L'approche Orchestra est une solution prometteuse pour les réseaux de capteurs sans fil à faible consommation d'énergie et à perte de paquets élevée, tels que les réseaux 6TiSCH (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e). Elle vise à optimiser l'utilisation des ressources radio et à améliorer les performances du réseau en ordonnant de manière déterministe l'activité des nœuds

Dans ce chapitre, nous analysons trois topologies de réseaux 6TiSCH de tailles différentes, Pour chaque topologie, nous évaluons les performances du réseau en termes d'utilisation des ressources radio, de fiabilité de la livraison des paquets et de stabilité du routage RPL

2. Topologie1 :

Configuration :

Nous avons chargé l'exemple de benchmark RPL-Req-Resp dans les nœuds du réseau et activé le mode TSCH, de sorte que le nœud TSCH soit le même que le nœud racine RPL. Ensuite, nous avons configuré les time slots et les slot frames dans lequel :

- ORCHESTRA_CONF_EBSF_PERIOD : Définit la longueur du slot frame Enhanced Beacon Slot Frame (EBSF) à 397 time slots, soit une durée totale de 3,97 secondes.
- ORCHESTRA_CONF_COMMON_SHARED_PERIOD : Définit la longueur du slot frame partagé commun à 31 time slots, soit 310 ms.
- ORCHESTRA_CONF_UNICAST_PERIOD : Définit la longueur du slot frame pour les communications unicast à 17 time slots, soit 170 ms.
- ORCHESTRA_CONF_ROOT_PERIOD : Définit la longueur du slot frame pour le nœud racine à 7 time slots, soit 70 ms, car le nœud racine reçoit généralement plus de trafic que les autres nœuds du réseau.

Après avoir configuré ces paramètres, nous avons ajouté l'approche Orchestra, qui est une solution d'ordonnement de nœuds pour les réseaux TSCH. Enfin, nous avons lancé la simulation avec ces configurations.

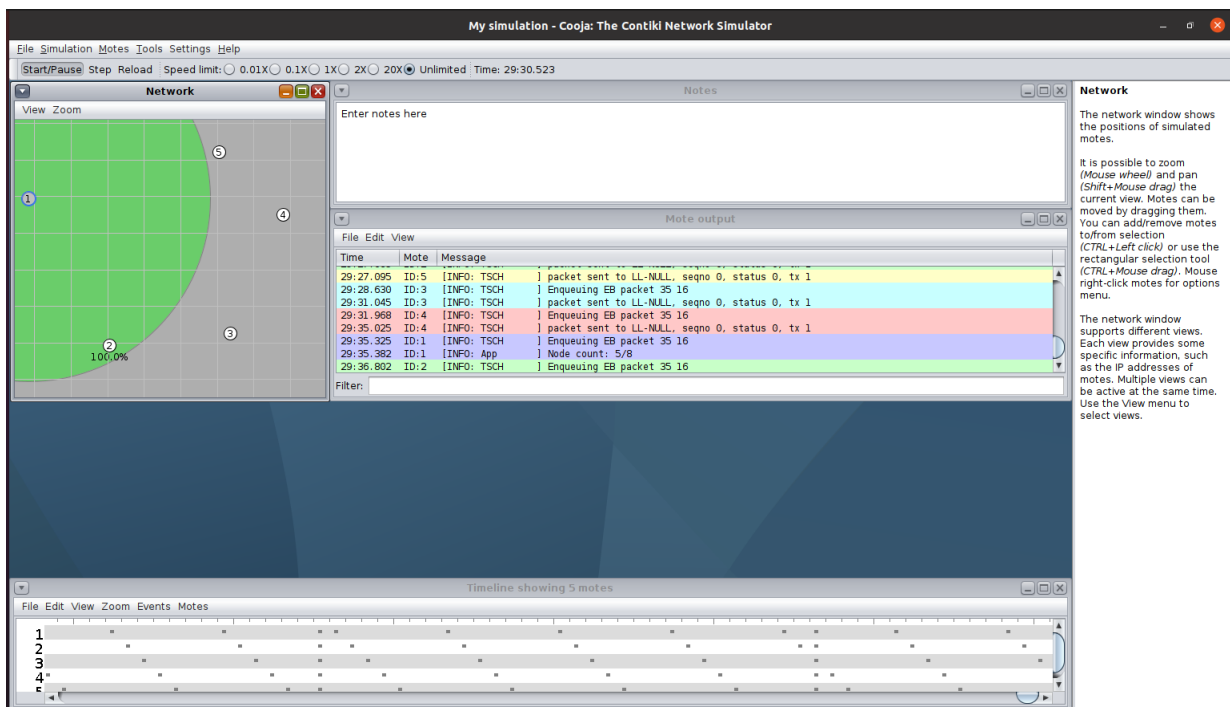


Figure 5 : Topologie1

Les résultats obtenus pour cette simulation sont illustré par les figures suivantes :

❖ **Charge de consommation énergétique :**

Ce graphique montre la charge de consommation d'énergie pour chaque nœud (2 à 5). Le nœud 5 a la charge la plus élevée, suivie des nœuds 4, 3 et 2.

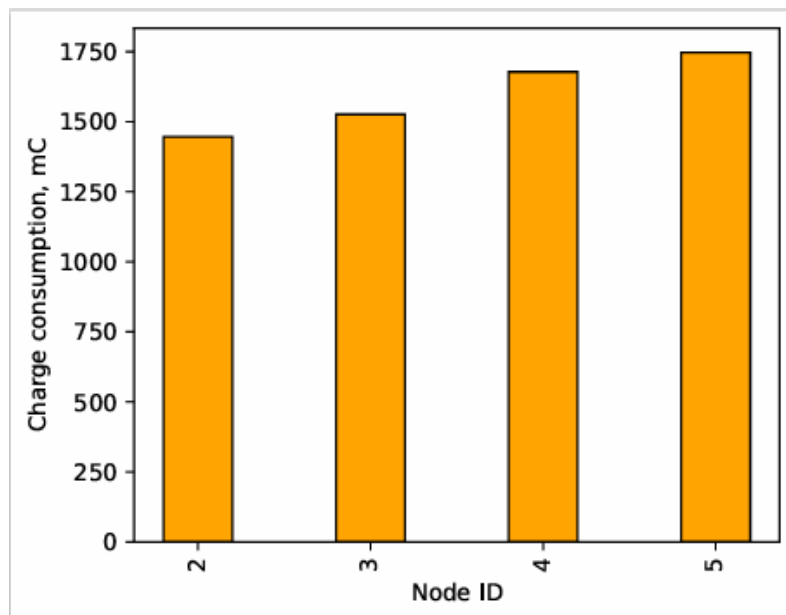


Figure 6 : La charge de la consommation énergétique

❖ Le cycle de service radio :

Est la proportion du temps pendant lequel la radio d'un nœud de réseau est active

Ce graphique montre le taux du cycle de service radio pour chaque nœud. Le nœud 5 a le taux le plus élevé, suivi des nœuds 4, 3 et 2.

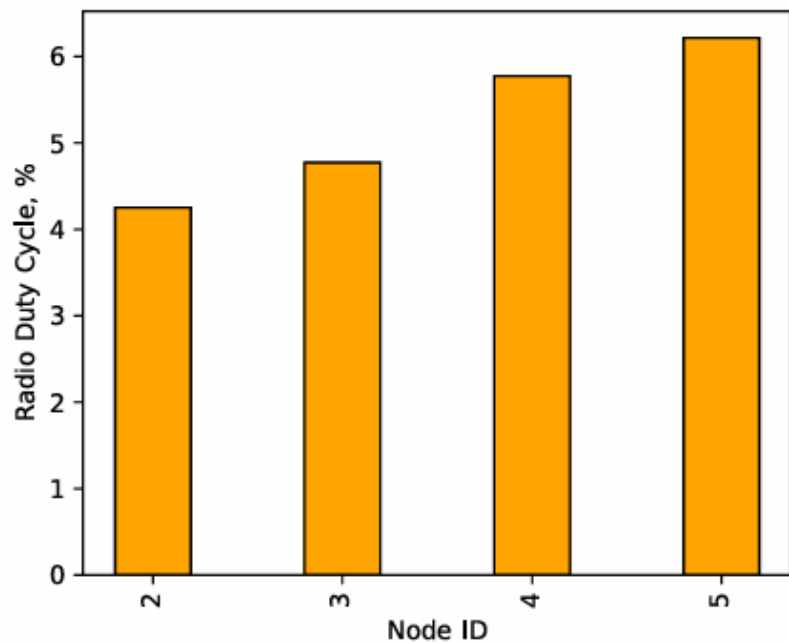


Figure 7 : le cycle de service radio

❖ Jointure radio :

Ce graphe représente le pourcentage de la jointure radio. Le joint radio indique la facilité avec laquelle un nœud peut rejoindre le réseau de façon fiable.

On peut observer que tous les nœuds ont un joint radio élevé, proche de 4, ce qui suggère que dans ce réseau expérimental, les nœuds parviennent à se connecter de manière très fiable

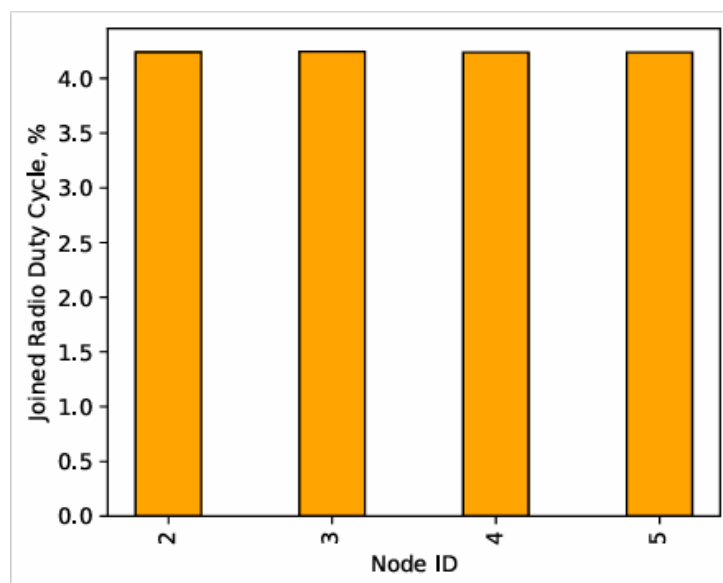


Figure 8 : la jointure radio

❖ Le taux des accusés de réception de paquets:

Packet acknowledgment, ratio : est une mesure de la fiabilité des communications dans un réseau. Il représente le pourcentage de paquets envoyés qui reçoivent un accusé de réception (ACK) de la part du destinataire dans ce graphe. On peut observer que pour tous les nœuds de (2 à 5), le packetacknowledgment ratio est d'environ 90%.

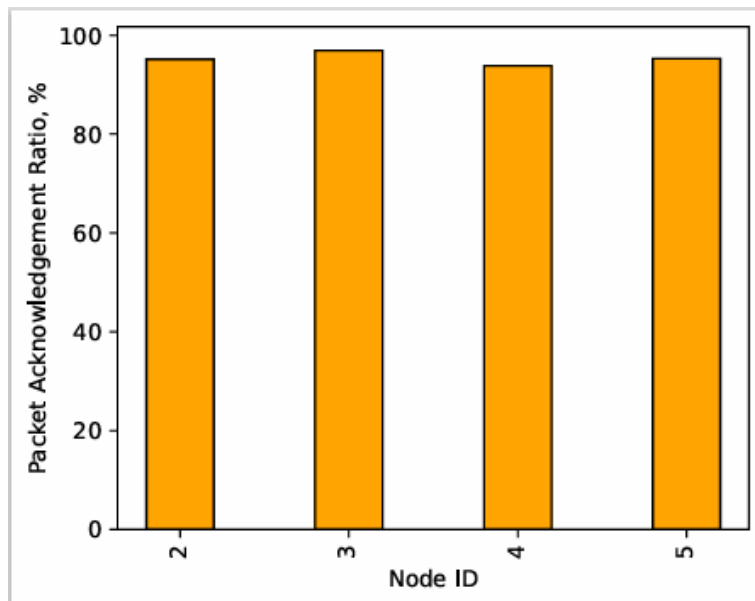


Figure 9 :Le taux des accusés de réception

❖ Le taux de livraison des paquets :

(PDR) est le taux de livraison des paquets dans un réseau. Il représente le pourcentage de paquets envoyés par la source qui sont correctement reçus par la destination. Est une mesure clé de la performance et de la fiabilité. Ce graphe montre le pourcentage de livraison des paquets pour différents nœuds. On constate que la plupart des nœuds ont un excellent taux de livraison des paquets, égale à 100%.

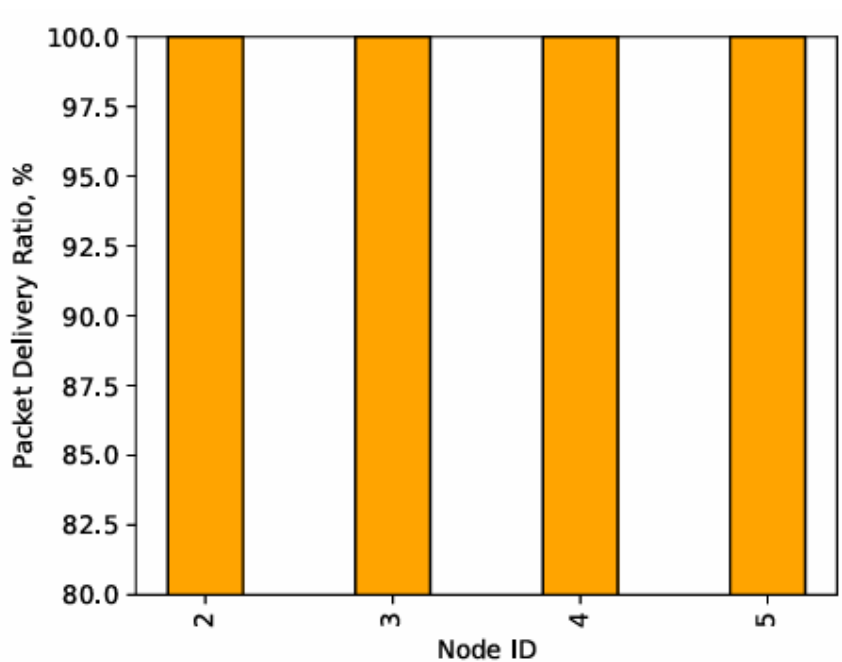


Figure 10 : le taux de PDR

❖ Rpl parent switching :

Ce graphe montre le nombre de changements de parent (RPL root). Le changement de parent peut améliorer la performance du routage et la robustesse du réseau en s'adaptant dynamiquement aux variations des conditions de communication. Le nœud 5 a effectué 2 changements de parent, en comparaison les nœuds 2, 3, et 4 ont effectué environ 1 changement de parent chacun, suggérant une plus grande stabilité dans leurs connexions.

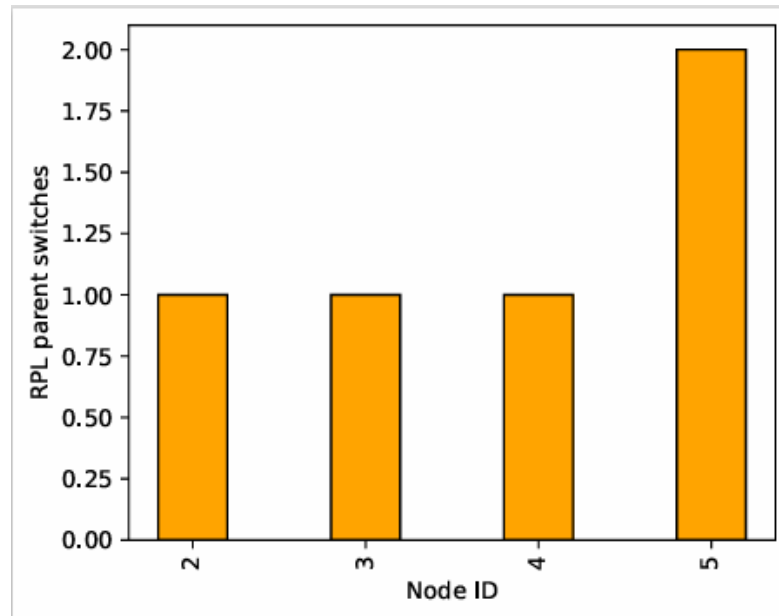


Figure 11 :rpl switching parent

3. Topologie2

La figure ci-dessus représente la deuxième topologie qui contient 10 nœuds et est configurée de la même manière du topologie 1.

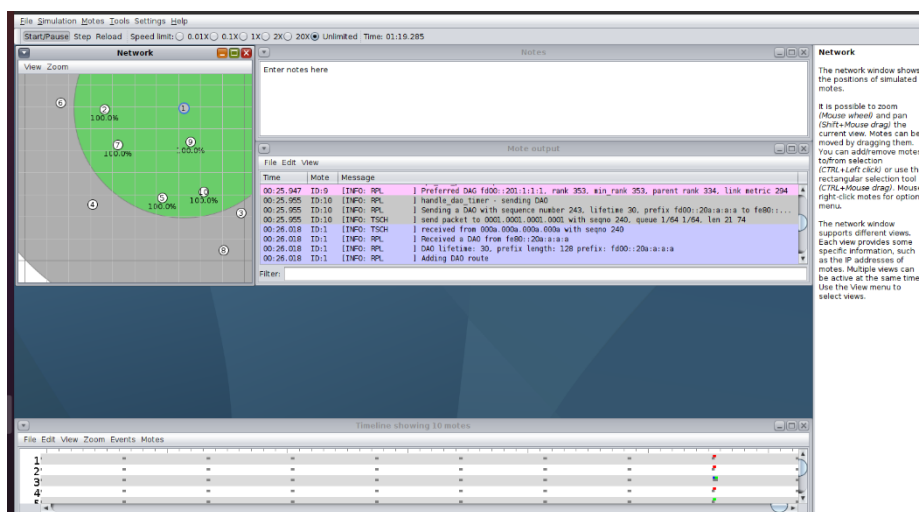


Figure 12 : Tpologie 2

❖ Charge de consommation énergétique :

Ce graphique montre la charge de consommation d'énergie pour chaque nœud de 2 à 10, tous les nœuds ont une charge de consommation presque similaire, autour de 1400 unités. Il n'y a pas de grande variation de la charge entre les différents nœuds.

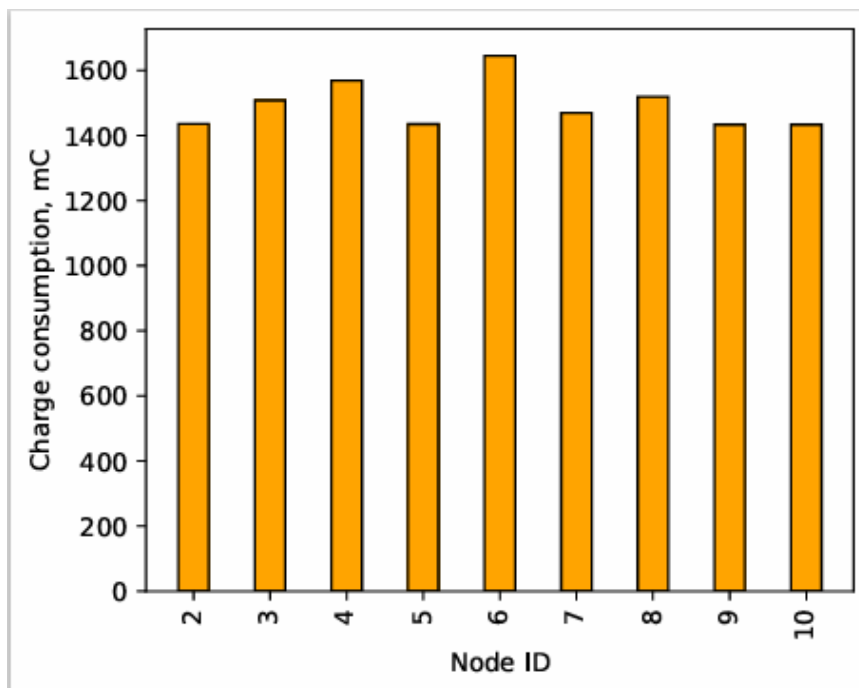


Figure 13 : Charge de consommation énergétique

❖ Le cycle de service radio:

Ce graphique présente le cycle de service radio pour différents nœuds du réseau. On observe une variation significative du cycle de service radio entre les nœuds, allant d'environ 6% pour le nœud 6 à plus de 4% pour autres nœuds. Cette variation peut être due à différents facteurs comme la charge de trafic, la position des nœuds ou la qualité des liens.

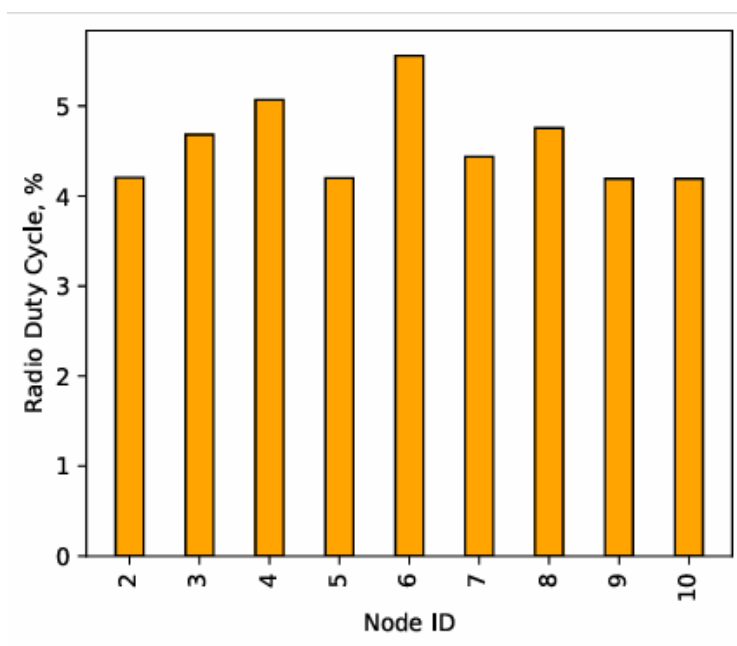


Figure 14 :Le cycle de service radio

❖ Jointure radio :

Ce graphique montre le taux du cycle de service combiné ou joint pour tous les nœuds. Le radio joint semble être constant à environ 4.2% pour tous les nœuds.

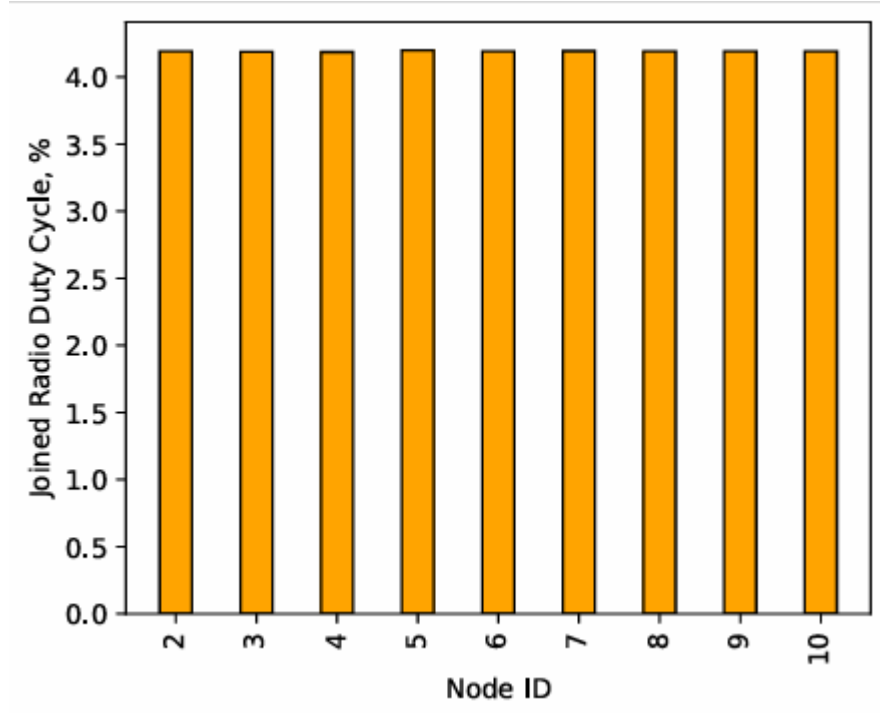


Figure 15 :Jointure radio

❖ Le taux des accusés de réception des paquets :

Ce graphe représente le taux d'acquittement des paquets pour chaque nœud. On remarque que tous les nœuds ont un taux d'acquittement de 98%, ce qui indique une excellente fiabilité de la transmission des paquets dans le réseau.

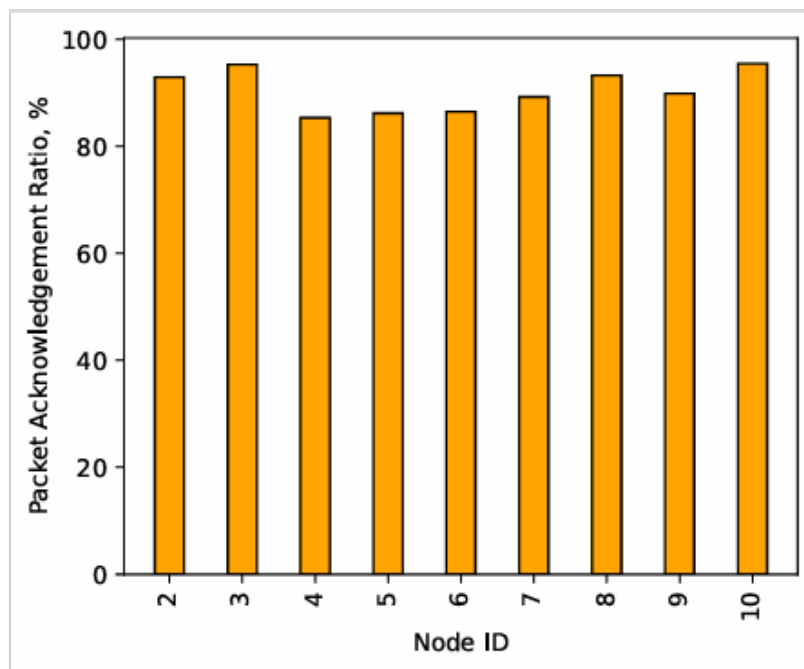


Figure 16 Le taux des accusés de réception

❖ Le taux de livraison des paquets :

Ce graphique représente le PDR pour chaque nœud. On remarque que l'ensemble des nœuds ont un PDR égale a 100 %malgré qu'on a augmenté un peu la taille du réseau

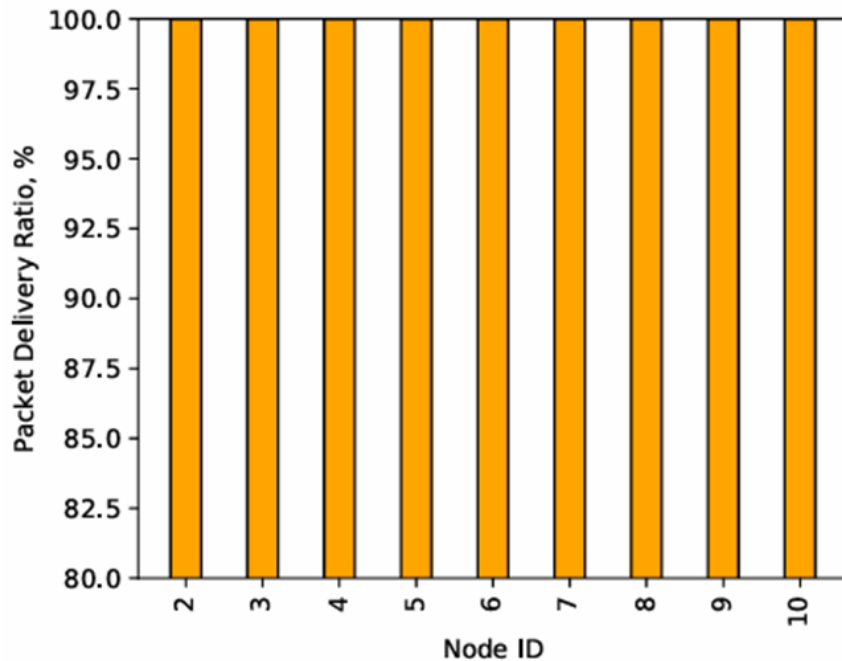


Figure 17 : Le taux de livraison de paquets

❖ RPL parent switching :

Ce graphique illustre le changement de root RPL pour chaque nœud. Les valeurs, comprises entre 0 et 1, semblent assez uniformes pour tous les nœuds, indiquant une bonne qualité des chemins de routage dans le réseau.

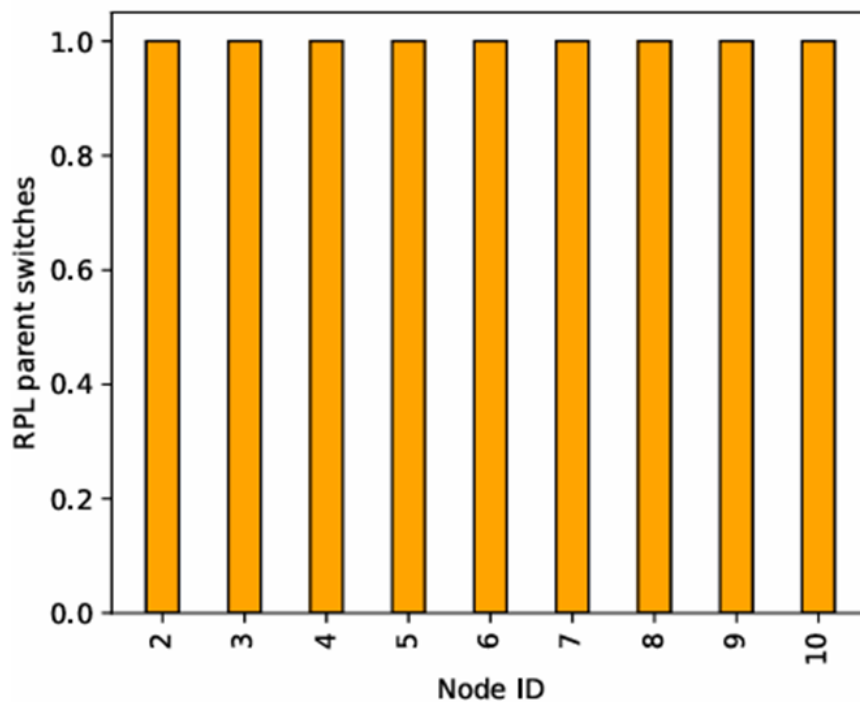


Figure 18 :Rpl parent switching

4. Topologie 3

La figure ci-dessus représente la troisième topologie qui contient 20 nœuds et est configurée de la même manière des autres topologies.

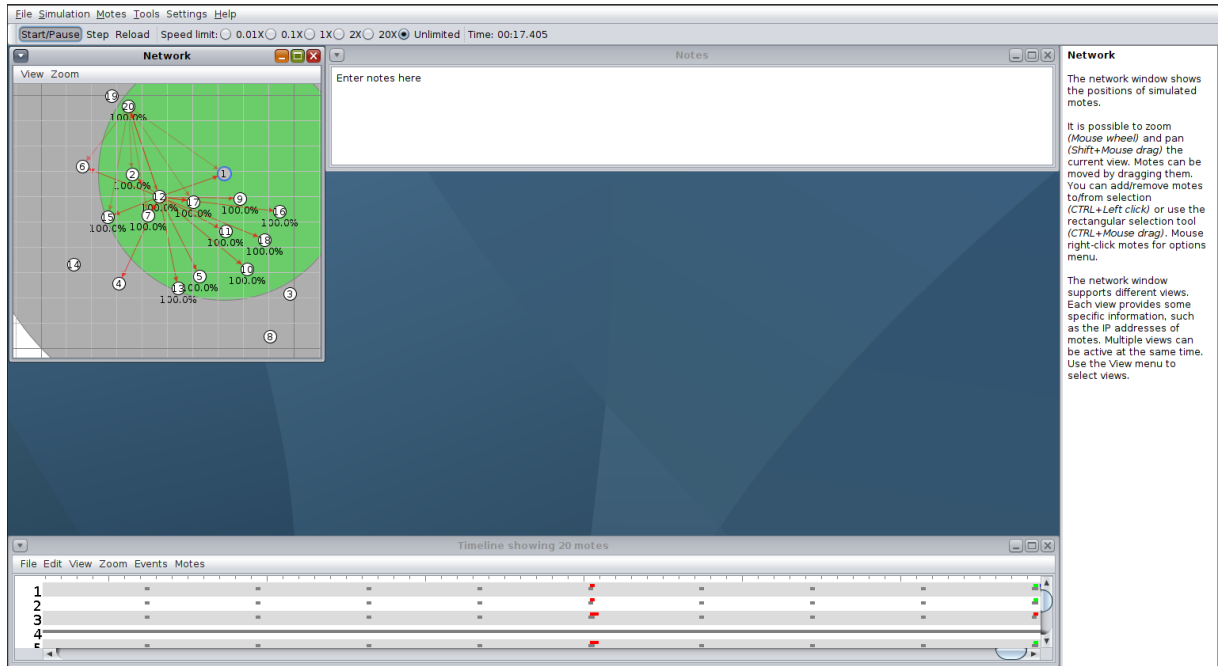


Figure 19 : Topologie 3

❖ Charge de la consommation énergétique :

Ce graphique montre la charge de consommation d'énergie pour chaque nœud de (2 à 20). Les nœuds 14 et 19 ont la charge la plus élevée, suivis des autres nœuds.

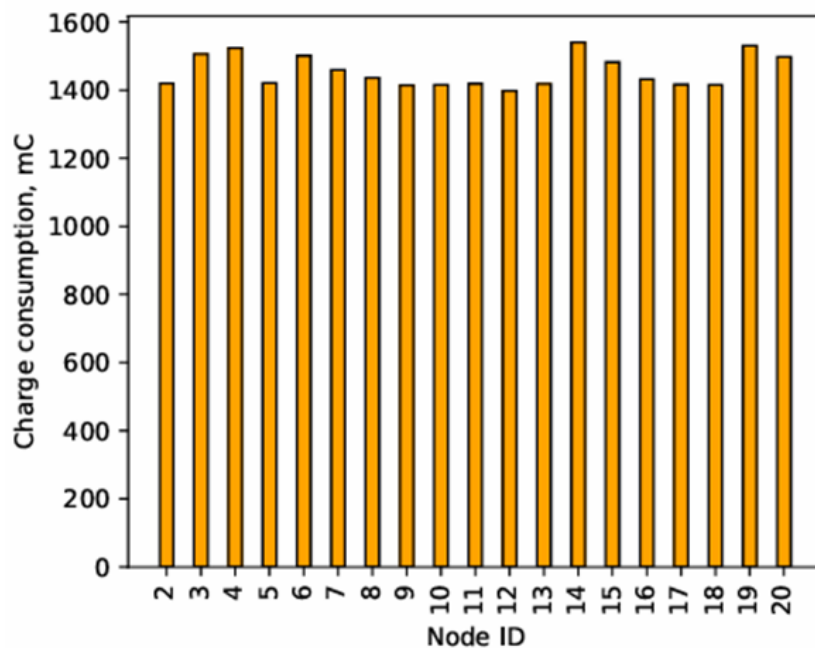


Figure 20 : Charge de la consommation énergétique

❖ Le cycle de service radio :

Dans ce graphe, on peut observer que pour la plupart des nœuds représentés, le radio duty cycle est d'environ 4%. Cela signifie que leur circuit radio est actif environ 4% du temps. Quelques nœuds, comme 4, 14 et 19, semblent avoir un duty cycle supérieure, autour de 4,6%.

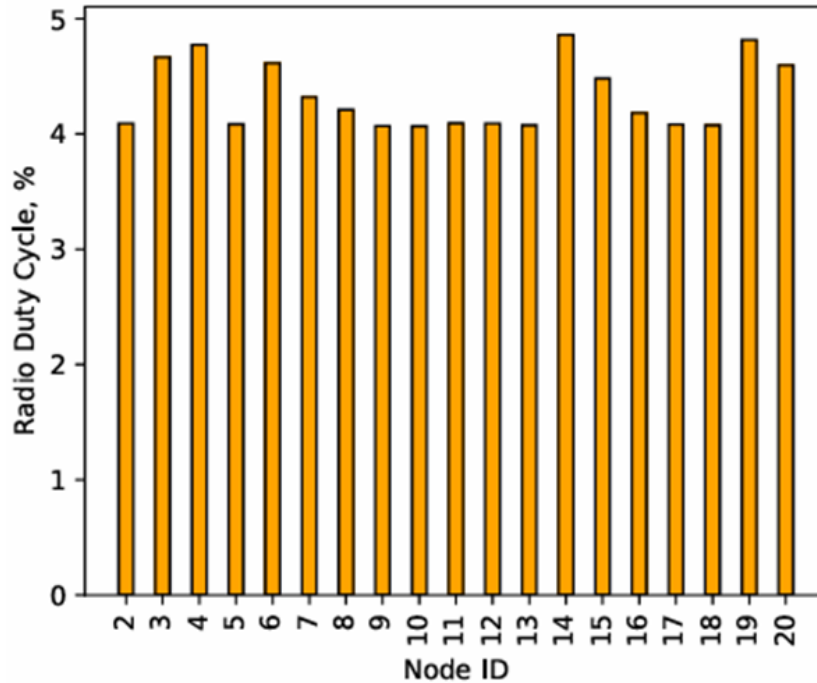


Figure 21 :Le cycle de service radio

❖ Jointure radio :

Ce graphe représente une métrique appelée "Joint Radio Duty Cycle" pour chaque nœud d'un réseau. La valeur reste relativement constante autour de 4% pour tous les nœuds, ce qui indique une utilisation uniforme des ressources radio dans le réseau. Cela suggère une bonne répartition de la charge et une efficacité énergétique globale satisfaisante.

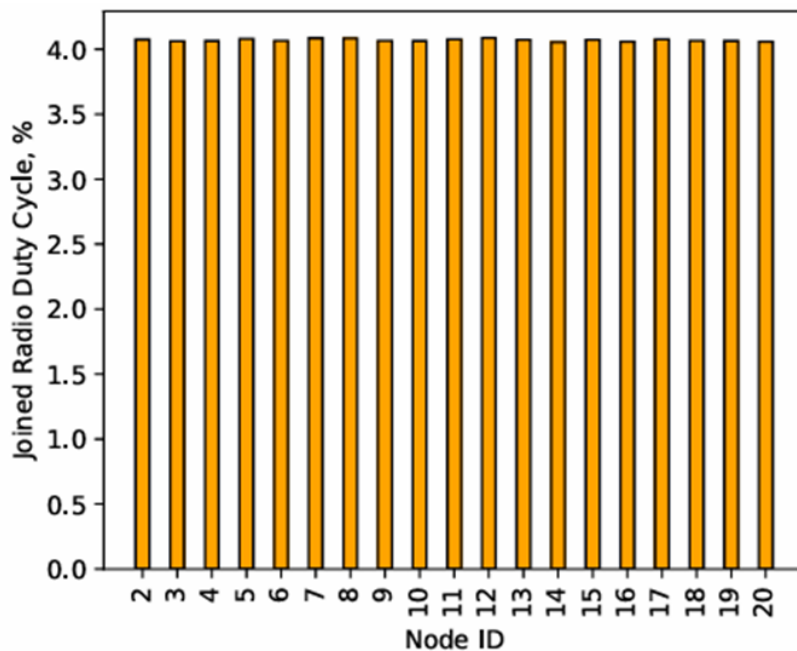


Figure 22 :la jointure radio

❖ **le taux des accusés de réceptions des paquets :**

Dans ce graphe on peut observer une variation assez importante du packet acknowledgment ratio entre les différents nœuds. Certains nœuds, comme le numéro 13, a un très haut taux d'accusés de réception, autour de 82%. D'autres, comme les nœuds 3 et 16 ont un taux aux alentours de 60%.

La plupart des nœuds se situent dans une plage intermédiaire, avec un taux d'accusés de réception compris entre 50% et 70%, cela indique une bonne fiabilité de la transmission des données.

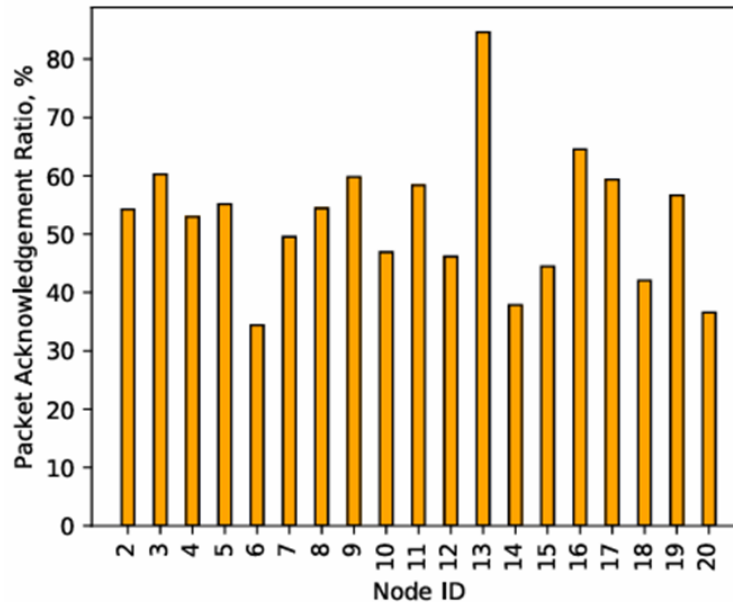


Figure 23 :Le taux des accusés de réceptions des paquets

❖ **Le taux de la livraison des paquets :**

Ce graphe montre le "Packet Delivery Ratio" pour chaque nœud. Les valeurs se situent principalement entre 97.5% et 100%, ce qui indique des taux de livraison de paquets très élevés dans l'ensemble du réseau. Quelques nœuds ont des ratios légèrement inférieurs, mais dans l'ensemble, la fiabilité de la transmission des données semble excellente.

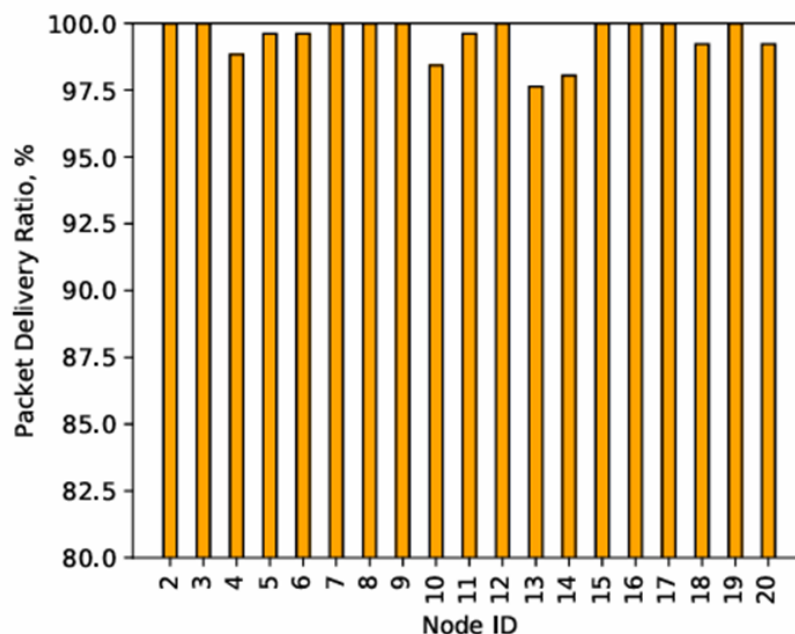


Figure 24 : Le taux de livraison de paquets

❖ **RPL parent switching :**

Ce graphe représente le changement de parent dans le réseau. La plupart des nœuds ont une valeur de 1, mais quelques nœuds présentent des pics importants, notamment les nœuds 13 et 14. Ces pics indiquent un nombre élevé de changements de parent RPL pour ces nœuds spécifiques, ce qui peut être dû à des problèmes de connectivité ou de mobilité.

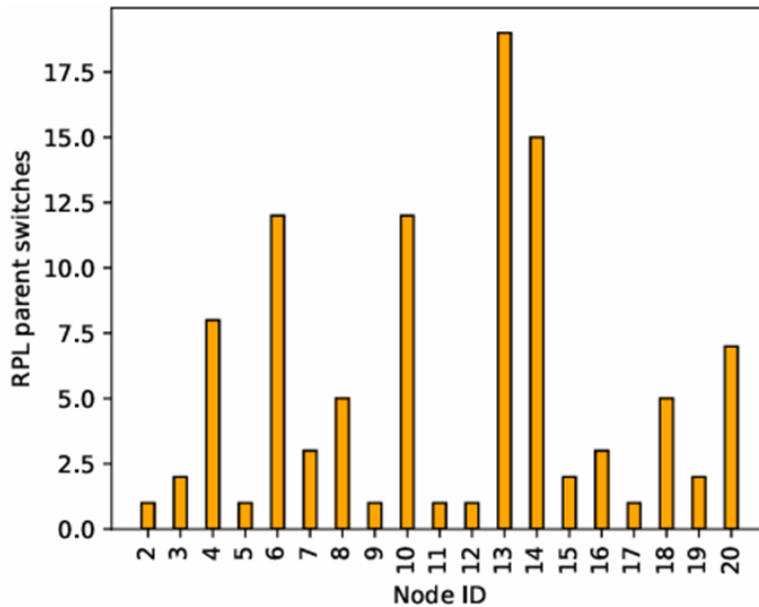


Figure 25 :RPL switching

5. Résultats :

Les résultats obtenus démontrent les performances remarquables de l'algorithme d'ordonnement Orchestra dans différentes topologies de réseaux 6TiSCH. Celui-ci parvient à maintenir un taux de livraison des paquets (PDR) élevé de 100% pour les topologies 1 et 2, et de 97% pour la topologie 3 plus dense. De plus, Orchestra se distingue par son efficacité énergétique avec une charge de consommation comprise entre 1600 mC et 1750 mC, tout en garantissant un pourcentage de jointure radio d'environ 4,2% pour l'ensemble des topologies évaluées. Malgré l'augmentation du nombre de nœuds, ces résultats témoignent de la capacité d'Orchestra à conserver des performances élevées en termes de fiabilité, d'utilisation optimale du spectre et de gestion efficace des ressources. Ainsi, ces niveaux de performance obtenus valident l'adéquation d'Orchestra aux exigences stringentes des réseaux industriels 6TiSCH, renforçant son positionnement comme solution d'ordonnement robuste et extensible pour les applications critiques des réseaux de capteurs sans fil.

6. **Inconvénient d'Orchestra :**

Bien que les résultats obtenus soulignent les performances élevées d'Orchestra en termes de taux de livraison, d'efficacité énergétique et d'utilisation du spectre, il convient de noter certaines limites inhérentes à cet algorithme d'ordonnancement. En effet, son approche statique basée sur une allocation prédéfinie des cellules temporelles manque de flexibilité pour s'adapter dynamiquement aux changements imprévisibles de la topologie réseau ou de la charge de trafic. De plus, Orchestra ne prend pas en compte les conditions réelles de propagation radio et de qualité des liens, ce qui peut conduire à des transmissions inefficaces dans des environnements bruyants ou à fortes interférences. Dans les réseaux de grande taille, la surcharge de contrôle pour la négociation et la maintenance des cellules peut également devenir significative, impactant les performances globales. Enfin, la complexité de déploiement et de configuration d'Orchestra, ainsi que son manque d'extensibilité pour de nouveaux services émergents de l'IoT industriel, représentent d'autres défis à prendre en considération malgré ses performances remarquables dans les scénarios évalués.

Conclusion :

En conclusion, cette étude vise à évaluer les performances de l'approche Orchestra dans différentes configurations de réseaux 6TiSCH. À travers l'analyse de trois topologies de tailles variées, nous chercherons à déterminer si cette solution d'ordonnancement déterministe permet effectivement d'optimiser l'utilisation de la bande passante radio tout en garantissant une livraison fiable des données et un routage stable. Les métriques clés évaluées seront le cycle d'activité radio des nœuds, les taux d'accusés de réception des paquets et les indicateurs de performances du protocole RPL. Cette analyse approfondie permettra de mieux cerner les forces de l'approche Orchestra, et d'identifier les configurations réseau les plus adaptées à son déploiement dans les réseaux de capteurs contraints en énergie et sujets à des pertes de paquets importantes.

Conclusion Générale et perspectives

Ce mémoire permet d'approfondir les concepts fondamentaux et le contexte technique de la technologie 6TiSCH, une solution clé pour répondre aux exigences des applications de l'Internet des Objets industriel (IIoT). Nous abordâmes les aspects essentiels de la norme IEEE 802.15.4 et de son amendement 802.15.4e définissant le mode TSCH au cœur de 6TiSCH. Le fonctionnement du mode TSCH, combinant multiplexage temporel et fréquentiel, apporta de nombreux avantages en termes de fiabilité, d'efficacité énergétique et de déterminisme grâce à son ordonnancement et ses sauts de fréquence coordonnés.

L'architecture 6TiSCH intégra ce mode TSCH avec les protocoles IPv6, permettant de créer des réseaux maillés flexibles et économes en énergie, adaptés aux contraintes des environnements industriels. Le rôle central de l'ordonnanceur pour l'allocation des cellules TSCH fut également souligné

.

Références bibliographiques :

Livre & Monographies

Thèses de doctorat :

[2] : Abdeddaim, M. N. (2012). "Analyse des performances d'un réseau de capteurs exploitant le standard IEEE 802.15.4." Thèse de doctorat, Université de Grenoble. Français. NNT: 2012GRENM067. HAL Id: tel-00767883

[9] : Rincon Vija, F. (2022). Enabling robust wireless communication for battery management systems in electric vehicles. Embedded Systems. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique. English. NNT: 2022

Mémoires de maîtrise :

[5] Abdi, M. O. (2020). "Optimisation de la performance d'un réseau de capteurs sans fil pour les applications de collecte de données à faible énergie et courte latence, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal

[20] : BADJADJ, Y., & MECHRAFI, M. C. (2015). Simulation d'un réseau de capteur sous Cooja avec adaptation du protocole CSMA/CA au temps réel (Mémoire de Master Professionnel, Université A/Mira de Béjaïa

Articles de journaux :

[1]: Righetti, F., Anastasi, G., Vallati, C., & Das, S. K. (2020). "Analysis of Distributed and Autonomous Scheduling Functions for 6TiSCH Networks."

[7] : Righetti, F., Vallati, C., Gavioli, A., & Anastasi, G. (2021). Performance Evaluation of Adaptive Autonomous Scheduling Functions for 6TiSCH Networks. *IEEE Access*, 10.1109/ACCESS.2021.3112266

[18] : Righetti, F., Vallati, C., Das, S. K., & Anastasi, G. (2020). Analysis of Distributed and Autonomous Scheduling Functions for 6TiSCH Networks. *IEEE Access*, 8, 163014-163038

Articles de conférences :

[10] : Soua, R., Minet, P., & Livolant, E. (2012). MODESA: An optimized multichannel slot assignment for raw data convergecast in wireless sensor networks.

[11] : M. R. Palattella, N. Accettura, M. Dohler, L. A. Grieco, and G. Boggia, Traffic aware scheduling algorithm for reliable low-power multi-hop IEEE 802.15. 4e networks, in 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC), pp. 327332, IEEE, 2012.

[12] : R. Soua, P. Minet, and E. Livolant, Modesa : An optimized multichannel slot assignment for raw data convergecast in wireless sensor networks, in 2012 IEEE 31st international performance computing and communications conference (IPCCC), pp. 91100, IEEE, 2012

[16] : F. Righetti, C. Vallati, G. Anastasi et SK Das, « Analyse et amélioration de l'algorithme de réservation de bande passante à la volée pour 6TiSCH », dans Proc. IEEE 19e International. Symp., juin 2018

Rapport technique :

- [6] : Vilajosana, X., Watteyne, T., Chang, T., Vučinić, M., Duquennoy, S. et Thubert, P. (2019). IETF 6TiSCH: A Tutorial. Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society, In press. hal-02420974
- [13] : Duquennoy, S., Al Nahas, B. et Landsiedel, O. (1 November 2015). Orchestra: Robust Mesh Networks Through Autonomously Scheduled TSCH
- [14] : S. Kim, HSS. Kim et C. Kim, « ALICE : planification de cellules basée sur des liens autonomes pour TSCH.,avril 2019
- [17] : Chang, T., Vucinic, M., Vilajosana, X., Duquennoy, S., & Dujovne, D. (2021). RFC 9033: 6TiSCH Minimal Scheduling Function
- [21] : Azizi, Ridha. Consommation d'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils : Étude Comparative et Expérimentale des Différents Protocoles de la Couche MAC des RCSFs. (2015)

livres

- [4] Tanenbaum, A. S. (2013). "Les Réseaux, 4ème édition." Pearson Education France
- [4] Tanenbaum, A. S. (2013). "Les Réseaux, 4ème édition." Pearson Education France

Documents web:

- [19] : <https://docs.contiki-ng.org/en/develop/doc/platforms/cooja.html>
- [22] : [What is Packet Delivery Ratio \(PDR\) | TEKTELIC Glossary](#)