

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du Diplôme
MASTER

Option :

Réseaux et Système Distribués

Thème

**Proposition et Validation d'une Amélioration du Protocole
de Communication TSCH dédié a l'IoT et L'industrie 4.0**

Présente par :

M^r Bouakazi. Mohamed
M^{elle} Brah. Souhila

Soutenu le 31 Octobre 2021 devant le jury composé de :

Présidente	<i>Dr L.BACHIRI</i>	MCB	Univ. de Bejaia
Examineur	<i>Dr S.MAMMERI</i>	MAB	Univ de Bejaia
Encadrante	<i>Pr L.BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE</i>	Professeur	Univ de Bejaia
Co-encadrante	<i>Dr S.TOULOUM</i>	Docteur	Univ de Bejaia

Année Universitaire 2020/2021

✱ Remerciements ✱

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

*Nous tenons tout d'abord à exprimer de tout cœur nos sincères remerciements à notre encadrante **Pr. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE Louiza** ainsi qu'à notre co-encadrante **Dr. TOULOUM Soraya** pour avoir bien voulu nous accompagner tout au long de la préparation de ce projet, pour les sages conseils et recommandations qui nous ont permis de réaliser ce modeste travail.*

Qu'elles trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

*Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département d'Informatique de l'université **ABDERRAHMANE MIRA**.*

Ainsi qu'à ceux et celles qui par, leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

** Ddicaces **

On dédie ce modeste travail :

A nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts, vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute notre reconnaissance et tout notre amour.

A nos frères et nos sœurs pour leur encouragement ainsi qu'à nos meilleurs amis.

A tous nos collègues de promotion avec qui nous avons passé notre meilleure année études.

A toutes celles et tous ceux qui nous ont aidé dans nos études. Tous ceux qu'on connaît et qu'on n'a pas pu citer.

***Brah Souhila
Bouakazi Mohamed***

Table des matières

Table des matieres	i
Liste des tableaux	iv
Liste des algorithmes	v
Notations et symboles	vi
Introduction générale	1
1 Introduction à l’Internet des Objet, l’Industrie 4.0 et les protocoles de communication utiliser dans ces derniers	3
1.1 Introduction	3
1.2 Industries 4.0	3
1.2.1 Origines de l’industrie 4.0 [3]	3
1.2.2 Évolution des réseaux industriels vers une communication sans fil	5
1.3 Internet des objects	10
1.3.1 Concept d’IdO	10
1.3.2 Objet connecté	11
1.3.3 Architecture de IdO [16]	12
1.3.4 Protocoles de IdO	14
1.3.5 Réseaux dédiés à l’internet des Objets IdO	17
1.4 Internet Industrie Les Object (IILO)	18
1.4.1 Gestion de l’énergie	19
1.4.2 Maintenances préventives	19
1.4.3 Automatisation	19
1.5 Réseau de capteurs sans fil (RCSF)	20
1.5.1 Définition d’un réseau de capteurs sans fil?	20
1.5.2 Architecture des RCSF	20
1.6 Conclusion	21

2	CONTEXTE GÉNÉRAL	22
2.1	Introduction	22
2.2	Modèle OSI	22
2.2.1	Couche MAC	23
2.2.2	Couche réseau	24
2.3	Trafic convergeant dans les réseaux de capteurs sans-fil	24
2.4	Standard IEEE 802.15.4	25
2.4.1	LR-WPAN	25
2.4.2	Limitations	27
2.4.3	Évolution de la norme IEEE 802.15.4	27
2.5	Standard IEEE 802.15.4e	29
2.5.1	Mécanismes MAC d'IEEE 802.15.4e [46]	29
2.6	Time Slotted Channel Hopping	31
2.6.1	Structure de la slotframe	31
2.6.2	Saut de canal [53]	31
2.6.3	Formation du PAN	32
2.7	Algorithme d'allocation de cellules optimisé TSCH (OSCAR)	33
2.7.1	Rang RPL	33
2.7.2	Conception	34
2.8	Conclusion	35
3	Synthèse de l'ensemble des travaux existants sur le mode TSCH et Proposition	36
3.1	Introduction	36
3.1.1	Ordonnancement centralisé	36
3.1.2	Ordonnancement distribué	37
3.1.3	Ordonnancement Autonome	37
3.2	Limitations de l'algorithme OSCAR	38
3.3	Proposition et validation	39
3.4	Conception	39
3.5	Simulation	42
3.5.1	Métriques de performance	42
3.5.2	Environnement de simulation	42
3.5.3	Évaluation des performances	44
3.6	Conclusion et Perspectives	46
	Bibliographie	48

Table des figures

1.1	Révolution industrielle [4]	5
1.2	Technologies de communication sans fil industrielles [5]	6
1.3	Evolution d'IdO [14]	11
1.4	Quelques exemples d'objets connectés [15]	12
1.5	Architecture de L'internet des Objets [18]	13
1.6	La topologie étoile [21]	14
1.7	La Topologie Peer to Peer [22]	15
1.8	Schéma de fonctionnement de MQTT [23]	16
1.9	Technologies de Communication [5]	18
1.10	Architecture classique d'un réseau de capteurs sans fils [37]	21
2.1	Pile de protocoles OSI	23
2.2	Exemple de réseau de capteurs Sans-Fil avec un trafic convergeant [40]	24
2.3	Topologies 802.15.4 [46]	26
2.4	Bandes de fréquences de IEEE 802.15.4 [47]	27
2.5	Structure d'une supertrame TSCH avec trois slots de temps [54]	31
2.6	Exemple d'un calendrier TSCH [54]	32
2.7	DODAG Construction [56]	34
3.1	Graphique de flux de conception de l'algorithme 2	41
3.2	Interface de COOJA	43
3.3	Délai entre NEW-OSCAR, OSCAR et Orchestra en fonction de la position des nœuds	45
3.4	Cycle de service entre NEW-OSCAR et OSCAR et Orchestra en fonction de la position des nœuds	46

Liste des tableaux

2.1	Les modifications IEEE 802.15.4 [47]	28
2.2	Modes de comportement MAC du standard IEEE 802.15.4e [38]	30
3.1	Évaluation qualitative des approches d'ordonnancement TSCH autonomes [38]	38
3.2	Le nombre des nœuds par classe	44

Liste des algorithmes

1	Reschedule la cellule en fonction de la classe	40
2	Réajustement du cycle de service	41

Notations et symbol

6LoWPAN IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks
AP Access Point
ACK Acknowledgement
AMCA Asynchronous Multi Channel Adaptation
BI Beacon Interval
BE Backoff Exponent
BO Beacon Order
CPL Courants Porteurs En-Ligne
CIM Computer Integrated Manufacturing
CoAP Constrained Application Protocol
CARP Channel-Aware Routing Protocol
CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CAP Contention Access Period
CLS Centralized Link Scheduling
CW Contention Window
DSME Deterministic Synchronous Multichannel Extension
DODAG Destination Oriented Directed Acyclic Graph
EDGE Enhanced Data Rate for GSM Evolution
ETSI European Telecommunications Standards Institute
E-CARP Enhanced Channel-Aware Routing Protocol
ED Energy Detection
EB Enhanced Beacon
ECH Enhanced coordinated Horizontal filling
FFD Full Function Device

FastA Fast Association

GSM Global System for Mobile Communications

GPRS General Packet Radio Service

HTTP Hypertext Transfer Protocol

ICT Information and Communications Technology

IdO Internet des Objets

IP Internet Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IPv4 Internet Protocol version 4

IPv6 Internet Protocol version 6

IETF6L-lowPAN IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks ou IPv6 LoW InterPAN

IETFRPL Internet Engineering Task Force-Routing Protocol for Low-Power

IETF Internet Engineering Task Force

IFS Inter Frame Space

IE Information Element

IOS International Organization for Standardization

LE Low-Energy

LLDN Low Latency Deterministic Network

LP-WAN Low Power Wide Area Network

LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Networks

LAN Local Area Network

LTE Long Term Evolution

MODESA Multichannel Optimized Delay Time Slot Assignment

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

MAC Media Access Control

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

MMS Multimedia Messaging Service

M2M Machine-to-Machine

Mbit/s Megabit per Second

MTU Maximum Transmission Unit

NS2 Network Simulator 2

NS3 Network Simulator 3

OTF	On-the-Fly
OSI	Open Systems Interconnection
OSCAR	Optimized Scheduling Cell Allocation Algorithm
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical layer
PSK	Phase-Shift Keying
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency IDentification
RV	Random Vertical filling
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMS	Short Message Service
SO	Superframe Order
TASA	Traffic-Aware Scheduling Algorithm
TASK	Ternary Amplitude Shift Keying
TDMA	Time-Division Multiple Access
TSCH	Time Synchronous Channel Hopping
UMTS	Universal Mobile Télécommunication System
XDSL	xDigital Subscriber Line
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Accessn
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WI-FI	Wireless Fidelity

Introduction générale

Internet des Objets (IdO) est une technologie qui comprend un réseau d'objets connectés à l'internet, dont lequel ces objets peuvent être identifiés individuellement lors de l'échange des informations. L'IdO peut surveiller et gérer les informations de ses objets en temps réel. De nombreuses universités, instituts de recherche et organismes de normalisation travaillent au développement de cette technologie. L'objectif de la technologie IdO est de connecter de nouveaux objets ou services réseau pour créer de nouveaux services ou améliorer les services existants. Cette tendance industrielle a influencé le domaine du contrôle industriel, ou une fusion de l'IdO avec la fiabilité existante. Cependant, dans les réseaux de capteurs filaires traditionnels, l'ajout, l'installation et la maintenance de nouveaux nœuds de capteurs est très difficile et coûteux. Pour remédier à ces problèmes, les réseaux de capteurs sans fil industriels tels que WirelessHart, ISA100.11a et IEEE 802.15.4e sont apparus comme une alternative aux réseaux filaires existants. Cependant, contrairement à WirelessHart et ISA100.11a, IEEE 802.15.4e ne définit que la couche MAC (*Media Access Control*).

TSCH (*Time Slot Channel Hopping*) est un protocole MAC défini dans la norme IEEE 802.15.4e, qui coordonne l'accès aux medias WSN (*Wireless Sensor Network*) selon une planification de communication basée sur le temps. La couche MAC TSCH joue un rôle essentiel pour répondre aux exigences de consommation d'énergie et de délai. Plus précisément, il s'agit d'un algorithme d'ordonnement des cellules qui détermine les actions que le nœud doit entreprendre dans chaque intervalle de temps (émission, réception ou veille). Afin de faire face à ces différents défis, plusieurs études ont été menées pour développer cet algorithme. Parmi ces algorithmes d'ordonnements, on trouve l'algorithme OSCAR (*Optimized Scheduling Cell Allocation Algorithm*) proposé par [1]. OSCAR est un algorithme d'allocation de cellules TSCH et d'ordonnement autonome basé sur l'algorithme ORCHESTRA pour répondre aux contraintes de consommation d'énergie et de délai. L'algorithme OSCAR diffère de l'algorithme ORCHESTRA dans le processus d'allocation des slots qui est en fonction de la position du nœud par rapport à la racine. Le but de cet algorithme est d'allouer des slots de temps aux nœuds en fonction de leurs besoins. Donc, chaque nœud est affecté à une classe selon son éloignement de la racine. Chaque nœud se voit attribuer un ID de classe, qui représente la couche qu'il occupe en fonction de la distance géographique de la racine. De plus, OSCAR offre un moyen d'ajuster le cycle d'utilisation de la

radio de chaque nœud et d'améliorer l'efficacité énergétique en éteignant la radio lorsqu'aucune donnée n'est reçue.

Dans ce mémoire, nous proposons une amélioration pour l'algorithme OSCAR. Un nouveau réajustement du cycle de service sera ajouté pour réduire la surconsommation d'énergie des nœuds inactif. Le mémoire est organisé en 4 chapitres, qui sont les suivants : Le chapitre 01, est un chapitre introductif à l'internet des objet et la qutrieme revolution industrielle nommée industrie 4.0. Le chapitre 2 présente le stundard IEEE 802,15,4e ainsi que son mécanisme TSCH. Le chapitre 3 mets en revue l'ensemble des travaux récents sur les algorithmes d'ordonnancement utilisés par le mode TSCH. Une attention particulière est portée à l'algorithme OSCAR et ses limitations. Le chapitre 4 décrit la conception détaillée de notre proposition, qui est un réajustement de cycle de service de l'algorithme de OSCAR. Ce chapitre présente les performances de la proposition en la comparant avec OSCAR.

Enfin, une conclusion avec des orientations de recherche futures soulevées par notre travail.

Introduction à l'Internet des Objets, l'Industrie 4.0 et les protocoles de communication utiliser dans ces derniers

1.1 Introduction

L'Internet des Objets (IdO) a créé une nouvelle révolution dans les industries. L'IdO dans l'industrie a donné lieu au terme (Industrie 4.0) où les systèmes sont connectés les uns aux autres via Internet et peuvent communiquer entre eux pour prendre les décisions nécessaires (aussi appelé communication M2M (*Machine-to-Machine*)) par l'Intelligence Artificielle (IA) [2].

Ce chapitre est consacré à l'introduction à l'industrie 4.0, l'Internet des Objets et les protocoles de communication utiliser dans ces derniers.

1.2 Industries 4.0

1.2.1 Origines de l'industrie 4.0 [3]

Le concept d'Industrie 4.0 est né de la réflexion allemande achevée en 2011. La réflexion a été initiée par le gouvernement allemand puis mise en œuvre par les universités du pays et les grands partenaires industriels, en se concentrant sur l'avenir de la fabrication. L'objectif, sans doute le moins ambitieux, est de définir les paramètres qui peuvent positionner l'industrie allemande comme la plus performante en termes de productivité et de flexibilité.

Le monde industriel a connu quatre révolutions comme le montre la figure 1.1. La première révolution a fait appel à l'énergie mécanique pour aider l'homme à transformer la matière. Avec l'avènement des chaînes de montage et des moteurs, la seconde révolution se caractérise par l'utilisation de l'énergie électrique.

Les machines à commande numérique, robots, automates et logiques programmables sont apparus dans les années 1950, 1960 et 1970.

Cette troisième révolution a favorisé l'émergence d'une production de masse à faible coût.

Au cours des quatre dernières décennies, nous avons vu les ordinateurs envahir la technologie de production du secteur industriel : la conception et la programmation de machines et de robots, et l'amélioration des automates. Cela a conduit à un changement dans les stratégies de fabrication de la production de masse à l'agilité industrielle.

Depuis son apparition, il ya plus de 20 ans, Internet a permis de partager de plus en plus d'informations entre particuliers et entreprises. Le protocole Internet (IP) peut même spécifier des adresses spécifiques pour envoyer et recevoir des informations. L'expéditeur et le destinataire peuvent être des ordinateurs, des imprimantes ou même d'autres objets aujourd'hui, tels que des unités, des commandes numériques ou des automates programmables. Ces données forment un véritable océan d'informations, que l'on doit apprendre à gérer.

La connectivité des données et des objets est le facteur décisif de l'Industrie 4.0. La connectivité des logiciels, des équipements, des données, des méga données à traiter et la sécurité du réseau sont devenues les éléments de base pour créer de l'intelligence dans les systèmes de fabrication, qui peuvent avoir une plus grande adaptabilité et une allocation plus efficace des ressources en production. C'est la définition de la quatrième révolution industrielle. Les enjeux sont élevés. Ils changeront les pratiques de la société dans son ensemble, en particulier les pratiques de fabrication liées aux styles de gestion, au travail et aux modèles d'affaires.

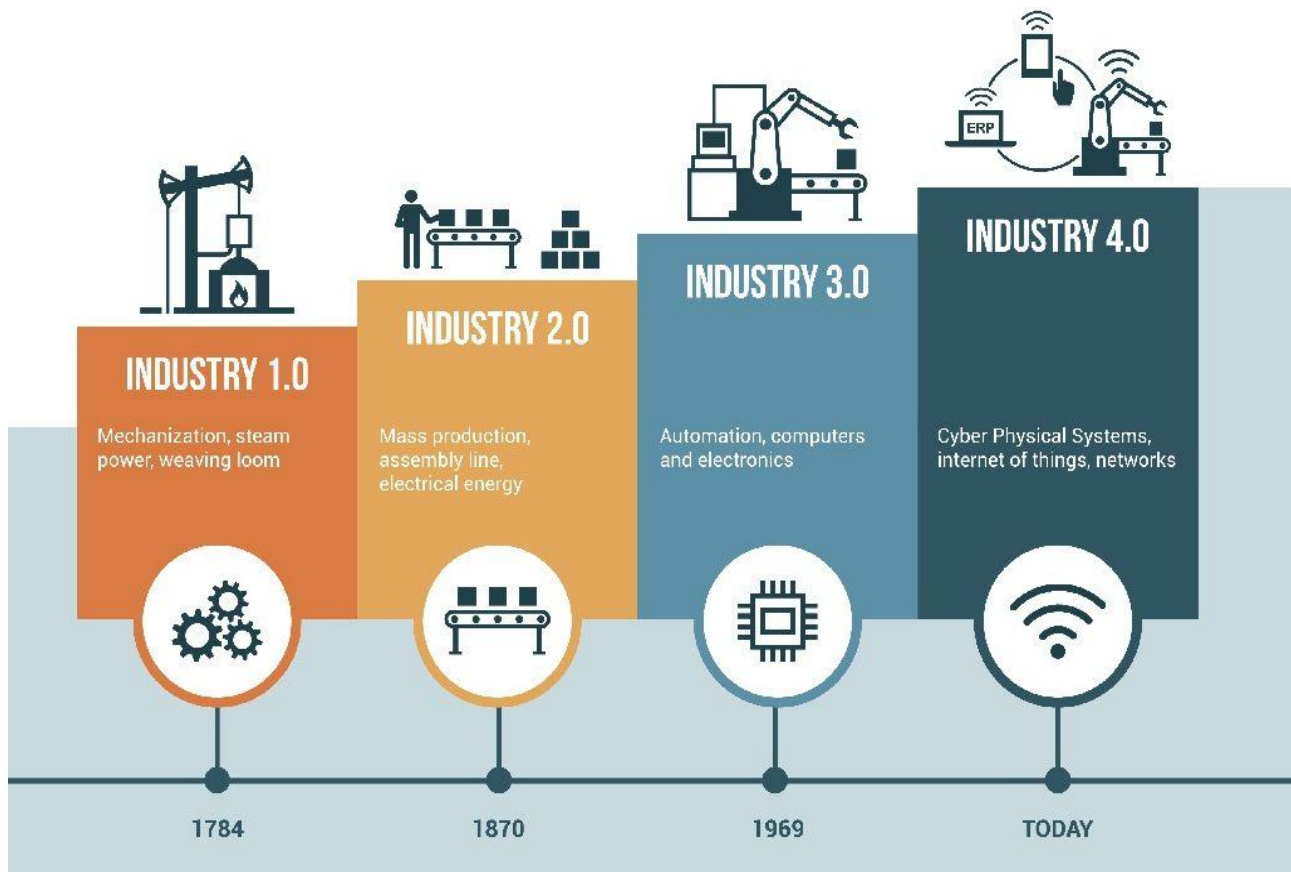


FIGURE 1.1 – Révolution industrielle [4]

1.2.2 Évolution des réseaux industriels vers une communication sans fil

Les dispositifs dédiés au génie des procédés sont généralement caractérisés par des structures réparties sur de grandes surfaces. L'obtention de données d'Entrée/Sortie (comme la température, la pression ...) nécessite souvent des coûts importants liés à la distance de parcourir (est de l'ordre de plusieurs centaines de mètres) par les câbles filaire. Les applications sont très dynamiques et doivent s'adapter rapidement pour passer d'une application à une autre. Dans le réseau de terrain, la technologie WLAN (*Wireless Local Area Network*) est utilisée pour gérer ces applications, pour les composants d'installation fixes, les signaux radio peuvent remplacer les Entrée/Sortie du système de réseau de terrain établi. La principale exigence pour l'utilisation des technologies sans fil dans les environnements industriels est qu'elles fonctionnent dans des environnements difficiles sans erreur et qu'elles soient aussi fiables que les communications filaires [5].

Les normes de communication sans fil appliquées dans l'environnement industriel sont illustrées sur la Figure 1.2 et varient en fonction de l'application, de la portée et de l'équipement utilisé. Pour le réseau personnel sans fil WPAN (*Wireless Personal Area Network*) à faible distance, des technologies telles que Bluetooth, WirelessHART (*Highway Addressable Remote Trans-*

ducer Protocol) et ZigBee sont déployées [5]. Les réseaux locaux sans fil WLAN de faible et moyenne portée utilisent la norme IEEE 802.11 communément appelée Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Les réseaux WWAN (*Wireless Wide Area Network*) distants déploient des réseaux LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) cellulaires et à faible consommation. Les paragraphes suivants passeront en revue ces différentes technologies et normes de communication sans fil.

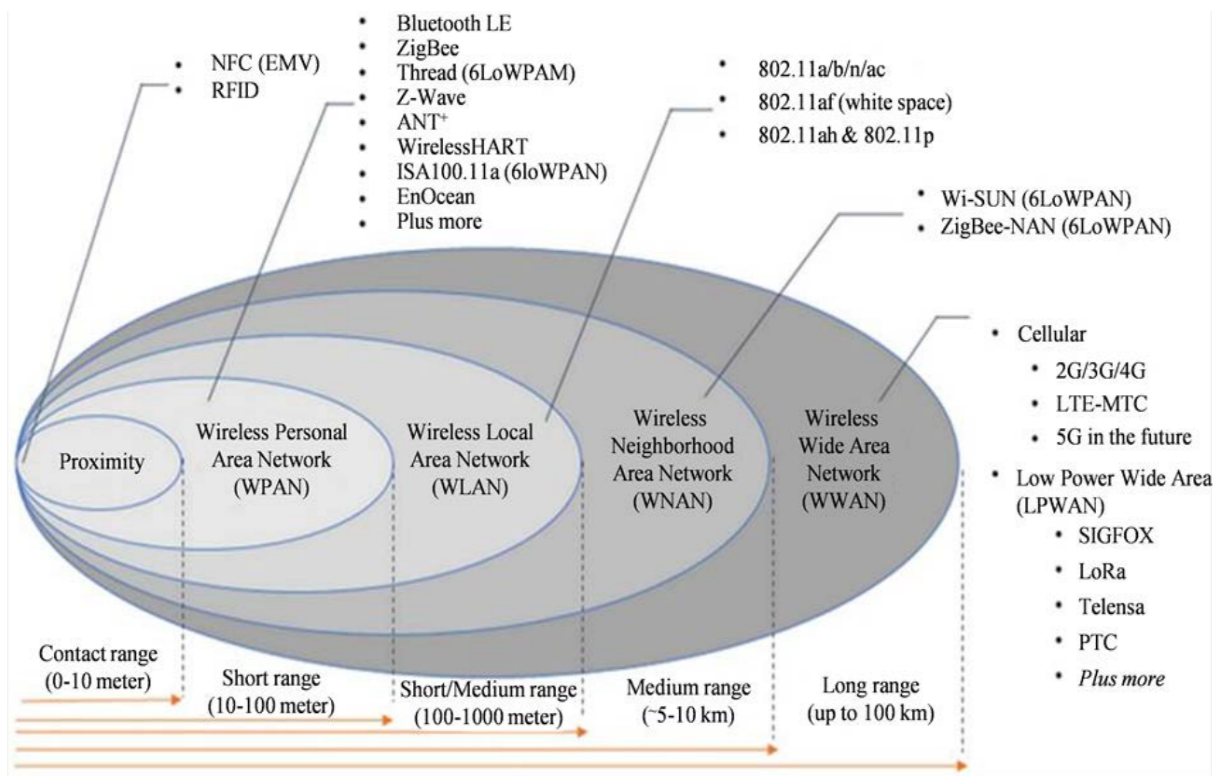


FIGURE 1.2 – Technologies de communication sans fil industrielles [5]

1.2.2.1 Trusted wireless

Trusted wireless est spécialement développé pour la transmission fiable de données et de signaux sur une longue distance de plus de dizaines de kilomètres sous la fréquence de 2.4 GHz. La nouvelle version 2.0 se caractérise par la dispersion du spectre et la gestion de la coexistence. Sur un réseau maillé avec jusqu'à 250 nœuds, le débit binaire des données varie de 16 à 500 Kbit/s. Cela implique une mise en réseau fiable des appareils Ethernet sur des distances allant jusqu'à 35 kilomètres. Les répéteurs permettent des distances encore plus grandes. La transmission radio est totalement transparente dans le réseau et prend en charge tous les protocoles IPv4 (*Internet Protocol version 4*) courants tels que Modbus-TCP, PROFINET ou Ethernet/IP [5].

1.2.2.2 Bluetooth

Cette technologie radio normalisée selon la norme IEEE 802.15.1 a été créée en 1994 et se caractérise par une transmission de données extrêmement fiable. En raison de l'utilisation efficace

de la fréquence, il offre la possibilité de coexister avec le fonctionnement en parallèle de nombreux systèmes Bluetooth dans un réseau radio inconnu. Il a une portée allant jusqu'à 200 mètre pour la version 5 et 100 mètre pour les versions précédentes [6] et une fréquence de 2.4 GHz. Bluetooth est généralement la bonne technologie sans fil pour assurer une transmission rapide et fiable des données CPL (*Courants porteurs en ligne*) dans des conditions industrielles difficiles. Le mode de fonctionnement Bluetooth garantit une connexion sans fil stable et fiable et peut être configuré rapidement et facilement. C'est devenu une solution de communication pour la transmission de données Ethernet et PROFINET à des parties mobiles de machines, en particulier dans l'industrie de la construction de machines et d'installations [5].

1.2.2.3 WirelessHART

La technologie WirelessHART est la première technologie sans fil dédiée au contrôle et à la surveillance de l'industrie des procédés. Cette norme a été développée par la HART Communication pour répondre aux besoins des réseaux sans fil déployés dans les installations de processus industriels [7]. WirelessHART est normalisée selon IEEE 802.15.4 et fonctionne également à 2.4 GHz. Elle se caractérise par sa simplicité, sa fiabilité et sa sécurité, et peut empêcher l'écoute et la manipulation. Elle dispose de plusieurs passerelles vers d'autres réseaux, tels que HART/Ethernet, HART/Profibus, et assure une excellente interopérabilité avec d'autres réseaux (Ethernet, Profibus, ControlNet, etc.).

1.2.2.4 ZigBee

La technologie ZigBee, également appelée IEEE 802.15.4, permet d'obtenir des liaisons sans fil à très faible coût et à très faible consommation électrique, ce qui la rend particulièrement adaptée à une intégration directe dans les petits appareils électroniques [7]. La technologie ZigBee fonctionne sur 16 canaux de la bande de fréquence 2.4 GHz, permettant d'obtenir des débits jusqu'à 250 kbit/s dans une portée maximale d'environ 100 mètre. Cela fait de cette technologie la meilleure technologie pour les équipements de contrôle dans les domaines de la domotique, des télécommunications, des réseaux de capteurs ou des domaines industriels.

1.2.2.5 EnOcean

EnOcean est le seul protocole radio standardisé ultra basse consommation et bénéficie d'un très large écosystème. Avec le slogan (sans fil, sans batterie et illimité), cette technologie peut simplifier l'installation et la maintenance des systèmes domotiques et d'automatisation industrielle. La technologie utilise la fréquence 868 MHz en Europe et la fréquence 902 MHz aux États-Unis, avec une portée de 300 mètre sans obstacles et de 30 mètre dans les bâtiments. Les produits EnOcean peuvent être utilisés de manière autonome et décentralisée (comme les interrupteurs et les prises), et peuvent également être utilisés à l'aide de centres ou de passerelles domotiques

centralisés. La passerelle permet d'accéder au réseau EnOcean vers l'extérieur (Internet, réseau local).

1.2.2.6 WLAN IEEE 802.11 (WiFi)

Le WiFi est une norme radio qui fonctionne dans la bande de fréquence 2.4 GHz ou 5 GHz selon la norme 802.11 a/b/g/n utilisée pour créer des réseaux locaux sans fil. La différence entre ces extensions réside dans leur couche physique et/ou leur mode d'accès au support. Le WiFi se caractérise par un taux d'information élevé allant jusqu'à 54 Mbits/s ou 300 Mbits/s et la mobilité des appareils au sein d'un large éventail de réseaux. En raison de la technologie spatio-temporelle avec plusieurs antennes MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), il s'agit d'une technologie très fiable. Grâce au WiFi, un réseau local filaire peut être partiellement complété par un WLAN sans fil sans même une prise en charge filaire.

L'Ethernet apparaît de plus en plus dans l'industrie, y compris au niveau du terrain, et diverses solutions Ethernet industrielles remplacent progressivement les bus de terrain traditionnels. En fait, la communication par bus de terrain sans fil est généralement possible, mais pas standardisée. Pour Ethernet, les solutions sans fil sont entièrement standardisées et différents appareils WiFi sont interopérables et largement disponibles. Dans l'industrie, le WiFi est utilisé pour connecter sans fil des appareils, tels qu'Ethernet, MODBUS/TCP, PROFINET, ou pour connecter des appareils série (RS232, RS422, etc.) entre eux. Cette technologie ne remplacera pas toutes les liaisons câblées, mais sa standardisation, sa flexibilité, ses performances et son coût attractif élargiront sans aucun doute son application dans l'industrie.

1.2.2.7 Réseaux cellulaires (2G/3G/4G, LTE)

Le réseau cellulaire de première génération de téléphones mobiles 1G a été utilisé au début des années 1980 et offrait une bonne qualité de transmission, mais la vitesse n'était pas suffisante pour envoyer de gros paquets de données. De plus, la sécurité des données n'est pas garantie et les coûts de déploiement sont très élevés. Nous devons envisager une nouvelle technologie, notamment parce que la demande de mobilité est trop importante.

A. GSM :

Au début du 21^{ème} siècle, le réseau GSM (*Global System for Mobile Communications*) était le standard de téléphonie mobile le plus utilisé en Europe. Il s'agit d'un standard téléphonique de deuxième génération (2G) dans lequel les communications fonctionnent en mode numérique [8]. En Europe, la norme GSM utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz. En revanche, aux États-Unis, la bande de fréquence utilisée est 1900 MHz. Par conséquent, un téléphone portable qui peut être utilisé en Europe et aux États-Unis peut être appelé téléphone portable tri-bande, et un téléphone portable qui ne peut être utilisé qu'en Europe est appelé téléphone portable à double fréquence. Le débit maximum autorisé par la

norme GSM est de 9,6 kbit/s, ce qui permet la transmission de la voix ainsi que des données numériques de faible capacité telles que les messages texte SMS (*Short Message Service*) ou les messages multimédia MMS (*Multimedia Messaging Service*). Dans l'industrie, le GSM est utilisé pour commander, contrôler et surveiller à distance des machines en envoyant et en recevant des messages SMS.

B. GPRS :

La norme GPRS (*General Packet Radio Service*) est une évolution de la norme GSM et est généralement appelée 2.5G. Le GPRS étend le cadre de la norme GSM pour autoriser la transmission de paquets de données, avec un débit théorique maximum d'environ 171,2 kbit/s (en réalité jusqu'à 114 kbit/s). En raison de l'utilisation du mode de transmission de paquets de données, la transmission de données n'utilise le réseau que lorsque cela est nécessaire. Ainsi, la norme GPRS peut facturer à l'utilisateur le nombre d'échanges plutôt que la durée de la connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut maintenir la connexion sans surcoût. La norme GPRS industrial est utilisée pour surveiller les machines et les installations en envoyant automatiquement l'état de l'application par SMS, e-mail et GPRS. Cela permet de minimiser les temps d'arrêt et d'optimiser les processus

C. EDGE :

La norme EDGE (*Enhanced Data Rate for GSM Evolution*) est une évolution de la norme GSM en modifiant le type de modulation. Comme la norme GPRS, la norme EDGE est utilisée comme transition vers les téléphones mobiles de troisième génération (3G). EDGE utilise la modulation 8-PSK (*Phase Shift Keying*), qui consiste à modifier les stations de base et les terminaux mobiles utilisés par la norme GSM. Par conséquent, cette technologie peut tripler le débit de données dans une zone de couverture réduite. Par conséquent, la vitesse de la station fixe peut atteindre 384 kbit/s, et la vitesse de la station mobile peut atteindre 144 kbit/s. Dans l'industrie, cette technologie permet une surveillance par transmission vidéo et d'images à grande vitesse. Cependant, elle ne convient que pour une télésurveillance temporaire dans une période de temps programmable via le détecteur de présence ou le contacteur de porte connecté à l'alarme. La 4G+ utilise la norme LTE (*Long Term Evolution*) Advanced, une version améliorée de LTE, et offre un débit théorique de 1 Gbit/s.

D. 3G/4G(LTE) :

La 3G est principalement représentée par l'UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), basée sur un autre système moins déployé, car elle nécessite la mise en place de nouvelles infrastructures, mais le débit est plus rapide [9]. En effet, bien que EDGE offre un débit de 120 kbit/s, la 3G peut atteindre 250 kbit/s. C'est pourquoi elle est considérée comme une technologie de visioconférence et d'accès à la télévision. Grâce à l'UMTS, les applications telles que la vidéo surveillance qui peuvent déjà être implémentées sur GPRS bénéficient d'une augmentation significative de la vitesse et de la qualité d'image. Le réseau mobile 4G de quatrième génération adopte la norme LTE, qui est nettement plus efficace que la norme UMTS du réseau 3G, et offre un débit de 150 Mbit/s. Il porte les téléphones

mobiles et leurs utilisateurs à un nouveau niveau, notamment grâce à l'utilisation de plusieurs antennes, qui peuvent être connectées à Internet très rapidement.

E. 5G :

La technologie 5G peut atteindre des vitesses de télécommunications mobiles de plusieurs gigabits de données par seconde, 1 000 fois plus rapides que les réseaux mobiles en 2013 et 100 fois plus rapides que la 4G. Le but n'est pas seulement de connecter les smartphones et les tablettes, mais plus généralement à tous les objets. Le réseau de communication mobile continue de croître et de se développer. Leur déploiement dépendra des applications et des activités à réaliser [10]. Pour les applications industrielles, les capteurs ou les actionneurs sont le système de communication clé. Ils sont situés au bas de la pyramide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) et permettent la collecte de données pour faciliter l'échange d'informations tout en minimisant l'utilisation de câbles.

1.3 Internet des objets

L'Internet des Objets (IdO) est un réseau d'objets physiques, tels que des gadgets, des instruments, des voitures, des bâtiments et d'autres éléments équipés d'électronique, des circuits, de logiciels, de capteurs et de connexions réseau pour collecter et partager des données. L'Internet des objets peut percevoir et contrôler les objets à distance via l'infrastructure réseau existante, permettant au monde physique d'être intégrée plus directement dans les systèmes informatiques et améliorant l'efficacité et la précision [11].

L'idée d'un réseau d'appareils intelligents a été proposée pour la première fois en 1982, lorsqu'une machine à coca modifiée, à l'Université Carnegie Mellon, est devenue le premier appareil en réseau [12], signalant l'inventaire et indiquant si la boisson nouvellement remplie était froide. Kevin Ashton (né en 1968) est un pionnier britannique de la technologie qui a inventé le terme (Internet des objets) pour décrire un système dans lequel Internet est connectée au monde réel via des capteurs omniprésents [11].

L'Internet des objets peut communiquer sans intervention humaine. Dans les secteurs de la santé, des transports et de l'automobile, plusieurs applications IdO de base ont été créées. Bien que la technologie de l'Internet des objets en soit encore à ses balbutiements, de nombreuses avancées significatives ont été réalisées dans l'intégration d'objets et de capteurs sur Internet.

1.3.1 Concept d'IdO

En 1999, Kevin Ashton a proposé l'Internet des Objets (IdO), qu'il a défini comme des éléments liés qui sont identifiables de manière unique à l'aide de la technologie RFID (*Radio Frequency Identification*) [13]. Cependant, la définition précise de l'Internet des objets est encore en cours d'élaboration, selon la perspective adoptée. L'Internet des Objets (IdO) est défini comme suit

“l’infrastructure de réseau mondiale dynamique des capacités d’auto-configuration basées sur des normes et des protocoles de communication”.

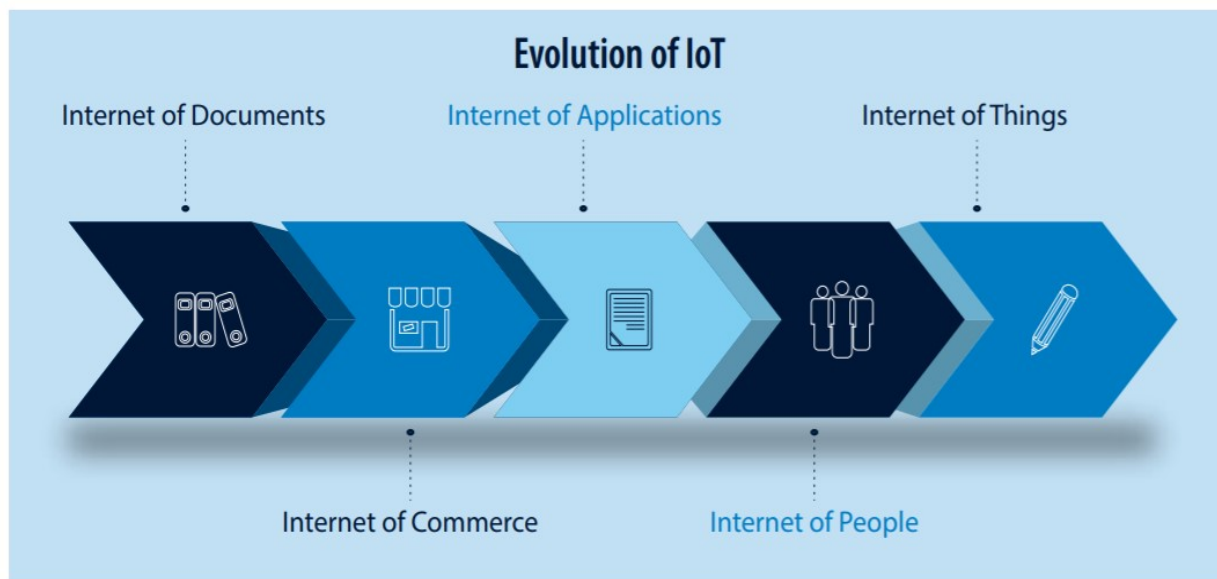


FIGURE 1.3 – Evolution d’IdO [14]

En regardant l’évolution d’Internet, on peut la diviser en cinq époques :

- L’Internet des documents : e-bibliothèques, pages Web basées sur des documents.
- L’Internet du commerce : sites Web de commerce électronique, de banque en ligne et de bourse.
- L’Internet des applications : Web 2.0
- L’Internet des personnes : Réseaux sociaux.
- L’Internet des objets : appareils et machines connectés.

Les objets physiques et virtuels de l’Internet des objets ont leurs propres identités et attributs, et peuvent utiliser des interfaces intelligentes et être intégrés dans un réseau d’informations. En termes simples, l’Internet des objets peut être considéré comme un ensemble d’appareils connectés identifiables de manière unique. (Internet) et (objets) font référence à des réseaux mondiaux interconnectés basés sur des capteurs, des communications, des réseaux et des technologies de traitement de l’information, qui peuvent être de nouvelles versions des technologies de l’information et de la communication ICT (*Information and Communications Technology*).

1.3.2 Objet connecté

L’émergence du concept IdO est due à la diversité des appareils et objets utilisés dans notre vie quotidienne (voir Figure 1.4) : ordinateurs, capteurs, actionneurs, smartphones, véhicules

connectés, maisons intelligentes, etc. Les objets avec des identités et des personnalités virtuelles s'exécutent dans des espaces intelligents et utilisent des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer dans des environnements aux usages variés [16].



FIGURE 1.4 – Quelques exemples d'objets connectés [15]

Les objets connectés sont des appareils électroniques capables de communiquer avec des smartphones, des tablettes tactiles et/ou des ordinateurs, et leurs caractéristiques peuvent évoluer dans le temps (localisation, niveau de batterie, etc.). Il peut envoyer et recevoir des informations via une liaison sans fil, Bluetooth ou WiFi. D'autres définitions s'accordent pour dire que les objets connectés ont des capacités de calcul, d'acquisition (*capteur*) et d'action (*actionneur*). Les objets identifiés par RFID ne sont pas inclus dans cette définition car les puces RFID traditionnelles ne peuvent pas être considérées comme des dispositifs informatiques, qui représentent des identifiants stockés en mémoire. L'intérêt principal de l'objet connecté est l'interactivité, la possibilité de récupérer des informations ou d'envoyer des statistiques, de rester en contact, etc.

1.3.3 Architecture de IdO [16]

Les racines d'IdO remontent à la technologie M2M (*Machine-to-Machine*) pour le contrôle de processus à distance. L'IdO d'aujourd'hui mélange plusieurs technologies, telles que RFID, NFC (*Near Field Communication*), capteurs et actionneurs sans fil, M2M, ultra-léger ou 3/4G, IPv6 (*Internet Protocol version 6*) et RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*), et doit définir une architecture et des normes pour favoriser son développement futur. L'architecture fournie par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) est divisée en trois domaines différents, le domaine du réseau objet, le domaine principal du réseau d'accès, le domaine d'application M2M et l'application cliente sont organisés en trois couches principales : la couche de perception des données, la couche réseau et la couche application, illustrés dans la figure 1.5.

- **Domaine du réseau d'objets** : Est la couche physique, qui contient des capteurs permettant de détecter et de collecter des informations sur l'environnement. Dans ce domaine, nous avons découvert différentes technologies pour interconnecter des objets M2M, RFID, Bluetooth, IETF6L-lowPAN (*IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks ou IPv6 LoW InterPAN*), IETFRPL (*Internet Engineering Task Force-Routing Protocol for Low-Power*) et des passerelles vers le réseau de transport central.
- **Domaine du réseau d'accès central** [17] : La couche réseau est responsable de la connexion d'autres objets intelligents, périphériques réseau et serveurs. Sa fonction est également utilisée pour la transmission et le traitement des données des capteurs. Dans ce domaine, on trouvera différentes technologies de réseaux de transmission et d'accès, telles que XDSL, WIMAX, WLAN, 3/4G, etc.
- **Domaine des applications M2M et applications clientes** : La couche application est chargée de fournir aux utilisateurs des services spécifiques à l'application. Les différentes applications que l'Internet des objets peut déployer, telles que les maisons intelligentes, les villes intelligentes et la santé intelligente. Ce domaine se compose de la plate-forme M2M, du middleware et de l'API. Applications M2M, processus métier utilisant IdO, etc [17].

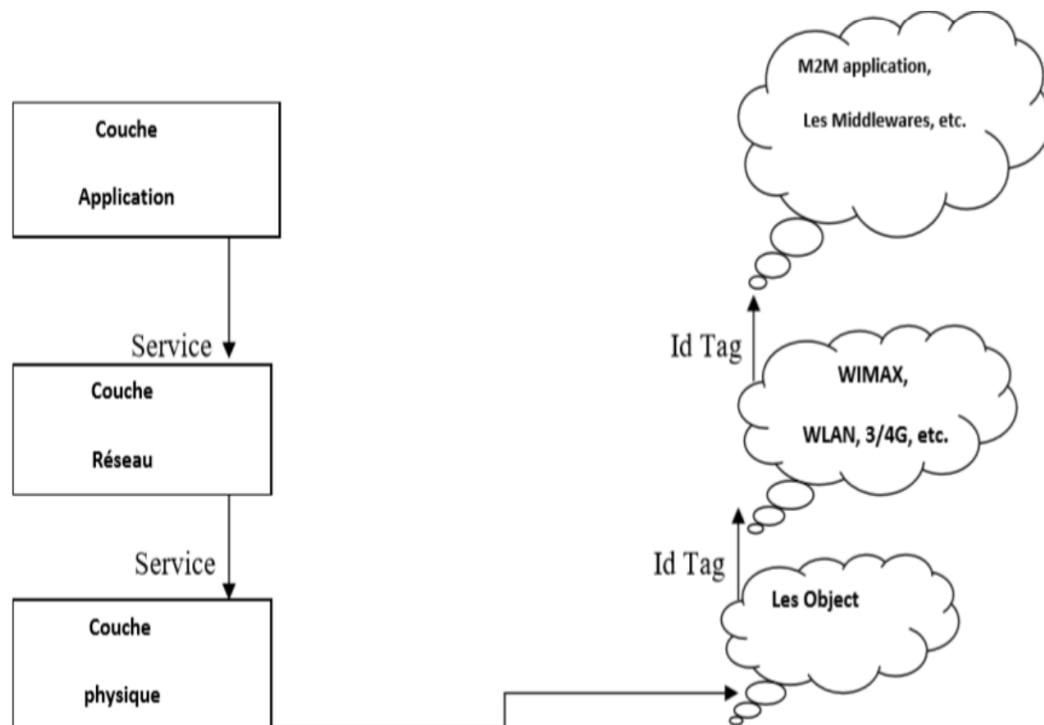


FIGURE 1.5 – Architecture de L'Internet des Objets [18]

1.3.4 Protocoles de IdO

- Au niveau de la couche de Liaison, le standard IEEE 802.15.4 est plus adapté que l’Ethernet aux environnements industriels difficile
- Au niveau réseau, le standard 6LoWPan a réussi à adapter le protocole Ipv6 aux communications sans fil entre nœuds à très faible consommation.
- Au niveau routage, l’IETF (*Internet Engineering Task Force*) a publié en 2011 le standard RPL.
- Au niveau de la couche application le protocole CoAP (*Constrained Application Protocol*) qui tente d’adapter HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), beaucoup trop gourmand aux contraintes des communications entre nœuds à faible consommation.

A. Protocole IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 est une norme conçue pour répondre aux besoins des applications de réseau sans fil à faible consommation, à faible débit de données et à faible coût. Elle a été utilisée dans la surveillance industrielle, la médecine personnelle, la domotique et d’autres domaines. Avec la demande croissante de fonctions temps réel, la prise en charge de la qualité de service est devenue un enjeu important dans ces domaines [19]. Le protocole IEEE 802.15.4 prend en charge deux structures topologiques [20] :

- **Topologie en étoile** : Le site communique uniquement avec un nœud central, qui est le coordinateur du PAN, et c’est la seule entité du réseau qui peut accepter de nouvelles connexions. La taille du réseau est limitée par la portée du coordinateur.

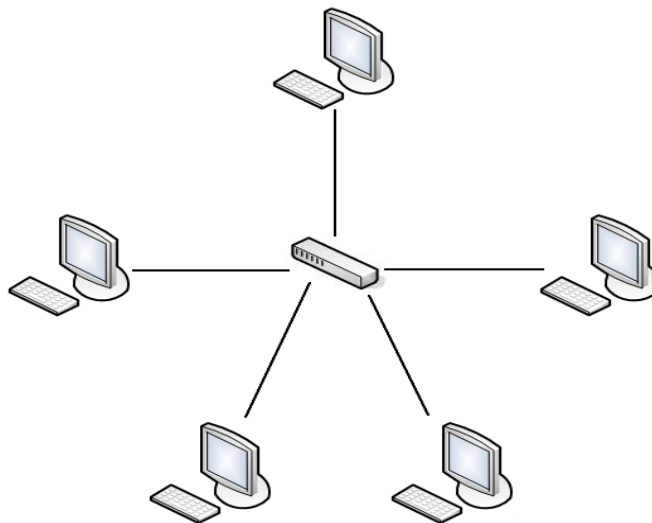


FIGURE 1.6 – La topologie étoile [21]

- **La topologie peer to peer** : Le sous-coordonateur du coordinateur PAN permet à d’autres entités de rejoindre le réseau par leur intermédiaire, formant ainsi un réseau

plus complexe et plus vaste, tel qu'un réseau maillé.

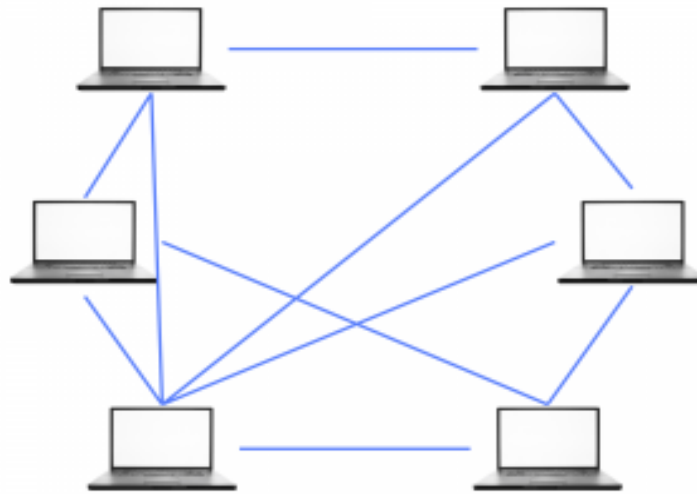


FIGURE 1.7 – La Topologie Peer to Peer [22]

B. Protocole MQTT [23]

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) protocole commence par observer l'interrogation de plus en plus d'appareils connectés, entraînant un gaspillage de bande passante en transmettant des informations non pertinentes. Il s'agit d'un protocole de type publication/abonnement (publication/abonnement), dans lequel les données envoyées par les appareils de terrain sont transmises à un serveur MQTT (agent), qui les catégorise et les fournit aux clients intéressés. Ces clients peuvent être le système SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) ou toute autre entité intéressée par certaines données publiées par le courtier. Les clients souscrivent aux services du courtier en choisissant le type de données qui les intéressent (Figure 1.8).

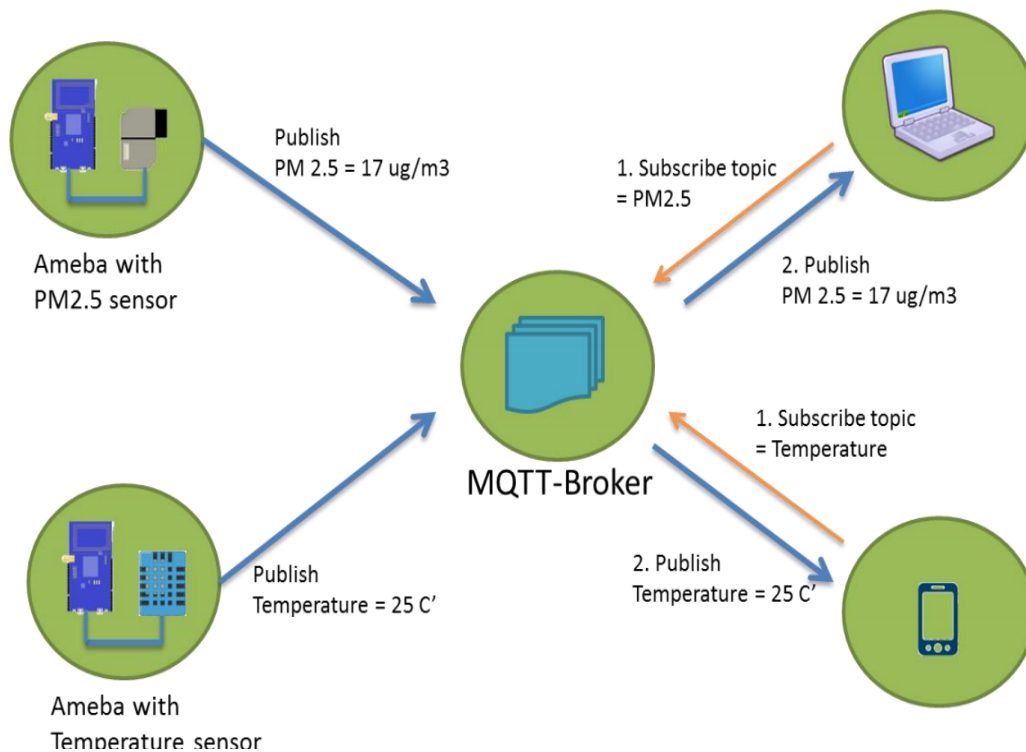


FIGURE 1.8 – Schéma de fonctionnement de MQTT [23]

C. 6LoWPAN

L'adoption de l'IPv6 en plus d'un réseau local sans fil (WPAN) de faible puissance est inapplicable puisque les WPAN de faible puissance ont une faible bande passante, de petites tailles de paquets et des dispositifs alimentés par batterie avec des capacités de traitement limitées. Il définit l'encapsulation et la compression d'en-tête pour réduire la surcharge, la fragmentation pour satisfaire aux exigences de MTU (*Maximum Transmission Unit*) IPv6, et réseau maillé qui prend en charge la transmission de deux couches [16, 24, 25].

D. Protocole CARP [26]

CARP (*Channel-Aware Routing Protocol*) est un protocole de routage distribué conçu pour la communication sous-marine. Il peut être utilisé pour l'Ido en raison de ses paquets légers. Il prend en compte la qualité de la liaison, qui est calculée sur la base des transmissions de données historiques réussies recueillies à partir de capteurs voisins, pour sélectionner les nœuds de transmission. Il existe deux scénarios : l'initialisation du réseau et le transfert des données. Lors de l'initialisation du réseau, un paquet HELLO est diffusé à partir du récepteur vers tous les autres nœuds des réseaux. Lors de la transmission des données, le paquet est acheminé du capteur vers le récepteur, et ce, étape par étape. Chaque saut suivant est déterminé indépendamment. Le principal problème de CARP est qu'il ne prend pas en charge la réutilisation des données précédemment collectées. En d'autres termes, si l'application requiert des données de capteur uniquement lorsque celles-ci changent de manière significative, le transfert de données CARP n'est pas avantageux pour cette application spécifique. Une

amélioration de CARP a été effectuée dans E-CARP en permettant au nœud collecteur de sauvegarder les données sensorielles précédemment reçues. Lorsque de nouvelles données sont nécessaires, E-CARP envoie un paquet Ping auquel sont répliquées les données des nœuds de capteurs. Ainsi, E-CARP réduit considérablement les frais de communication

E. Protocole RPL

Le groupe de travail IETF sur le routage a récemment proposé un protocole de routage IPv6 pour les réseaux à faible consommation et avec pertes, qui est le protocole RPL. Il est conçu pour répondre aux exigences typiques des réseaux de capteurs sans fil. Compte tenu de sa pertinence dans l'industrie et la science.

1.3.5 Réseaux dédiés à l'internet des Objets IdO

La technologie de connexion sans fil utilisée pour l'objet est très riche. Le choix de la stratégie de connexion est basé sur plusieurs critères et repose sur l'élargissement de la sélection des capteurs. Par exemple, afin de sélectionner un réseau pour traverser des obstacles, vous devez prendre en compte des emplacements très difficiles d'accès. Ou adaptez le choix à la vitesse requise pour relever les défis de l'entreprise. Ce choix dépend principalement de sept phénomènes : emplacement (intérieur, extérieur, souterrain...), mobilité, consommation électrique, télécommande, volume de données, fréquence de transmission et sécurité.

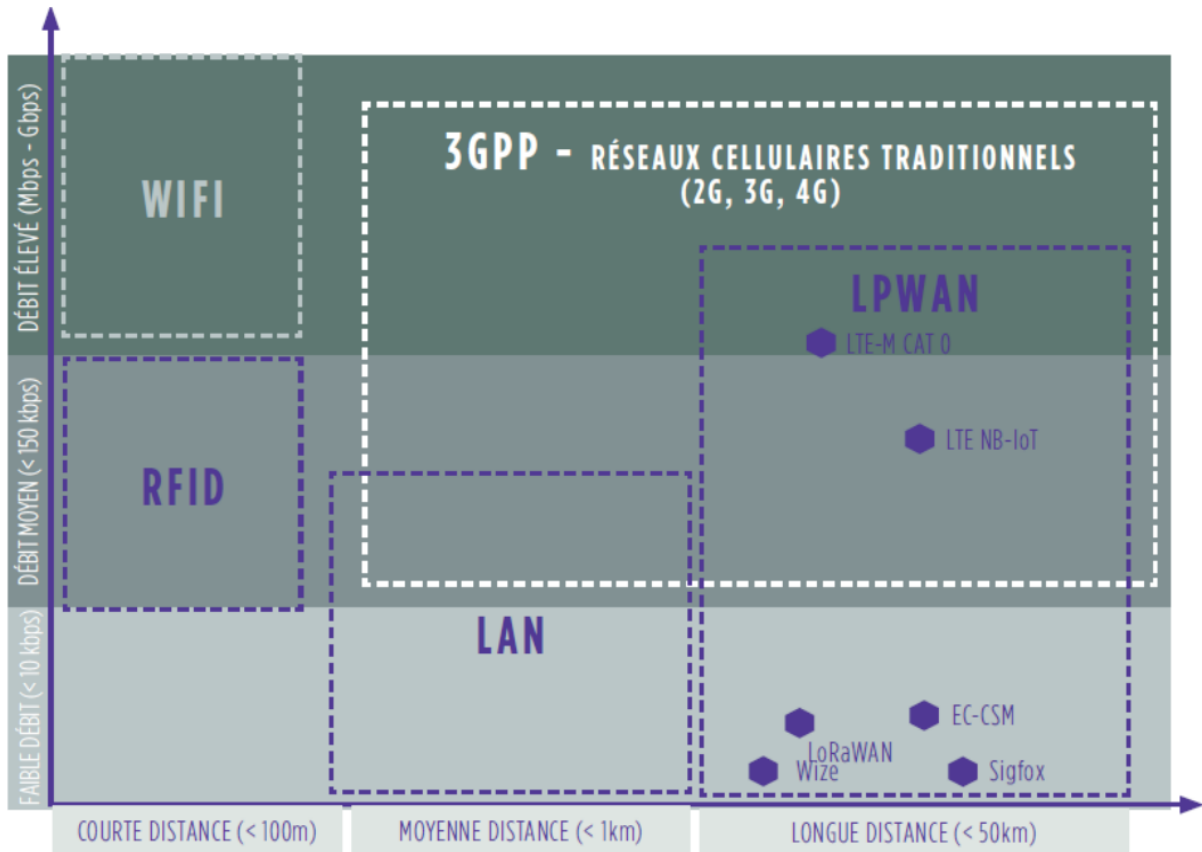


FIGURE 1.9 – Technologies de Communication [5]

Bien que certains objets connectés utilisent de petits réseaux, qu'il s'agisse d'une simple connexion M2M ou d'un réseau de type LAN, la grande majorité des objets utilisent le réseau WAN distant illustré à la Figure 1.9, qui est directement basé sur l'Internet des objets. Aujourd'hui, la plupart de ces connexions sont établies via les réseaux mobiles existants (principalement la 4G). Cependant, de nouvelles technologies ont été développées pour mettre en œuvre des réseaux spécifiques à l'IdO basés sur le LPWAN et à faible consommation pour les applications à faible débit de données et une longue durée de vie de la batterie. Sans surveillance depuis longtemps. Citons ci-dessous les différents réseaux dédiés à l'Internet des Objets.

1.4 Internet Industrie Les Object (IILO)

L'Internet des Objets a un impact dans différents domaines. Par exemple, les voitures autonomes sont un objet IdO en cours de développement [27]. L'industrie subit également des changements dans les modes de fonctionnement liés à l'Internet des Objets. En raison des besoins spécifiques de l'industrie. Par exemple, IIdO peut détecter des pièces défectueuses et mesurer la qualité des produits en fin de ligne de production (détection de défauts). Les auteurs [28]

Déterminer quelques applications de l'Internet des Objets dans les environnements industriels. Nous allons en voir quelques-uns.

1.4.1 Gestion de l'énergie

L'Internet des objets apporte une nouvelle perspective à l'industrie. Le premier concerne la gestion de l'énergie. Nous avons vu que l'efficacité des ressources est au cœur de l'Industrie 4.0. L'Internet des objets peut gérer activement la puissance des appareils. En 2014, les auteurs [29] propose un moyen d'améliorer l'efficacité énergétique. Cette méthode utilise des capteurs et des sondes pour surveiller et analyser la consommation d'énergie en temps réel. Ensuite, une fois analysées, les données peuvent définir des stratégies et introduire de nouvelles pratiques. Il peut ensuite réitérer jusqu'à ce que l'efficacité maximale soit atteinte. Dans le même esprit, les auteurs [30] ont proposé d'améliorer l'efficacité énergétique de l'Internet industriel des objets. Ils ont proposé un cadre pour améliorer l'efficacité. L'idée est d'organiser des événements et de regarder des moments pour qu'ils deviennent prévisibles. L'amélioration de l'efficacité énergétique est significative. L'élargissement de l'échelle peut économiser beaucoup d'argent. Cependant, il n'est pas précisé si une dégradation des performances s'est produite.

1.4.2 Maintenances préventives

On voit qu'il est possible de résoudre le problème d'efficacité énergétique. Un autre point de l'Industrie 4.0 est de limiter les temps d'arrêt. La maintenance préventive est une solution. Cependant, il doit être fait au bon moment. En 2012, les auteurs [31] ont recommandé l'utilisation de l'Internet des Objets pour prévoir les pannes. Les données sont acquises via des capteurs ou le système cyber-physique lui-même. Afin de faire des prédictions, les articles [32] et [33] proposent d'utiliser des outils de big data. Ces outils sont spécifiquement conçus pour traiter de grandes quantités de données, ils ont donc de bonnes performances. Les auteurs [32] ont utilisé leur solution pour obtenir de meilleures prédictions que les estimations empiriques traditionnelles.

1.4.3 Automatisation

L'Internet des Objets permet de répondre à un besoin spécifique de l'industrie : l'automatisation. Dans l'Industrie 4.0, la flexibilité est un point clé. Pour cela, la ligne de production doit être reconfigurable. Les robots qui composent ces lignes de production doivent pouvoir supporter les évolutions de leurs modes opératoires. L'Internet des Objets rend possible cette intelligence accrue. Les machines produites par le couplage de robots et de l'Internet des Objets font partie du système cyber-physique [34]. Ces systèmes doivent être connectés au réseau. Par conséquent, le "monde des réseaux" est confronté à de nouveaux défis techniques [35].

1.5 Réseau de capteurs sans fil (RCSF)

1.5.1 Définition d'un réseau de capteurs sans fil ?

Le réseau de capteurs sans fil (RCSF) est composé d'un groupe de très petits dispositifs, appelés nœuds de capteurs, qui sont interconnectés les uns avec les autres, allant de dizaines d'éléments à plusieurs milliers [36]. Dans ces réseaux, chaque nœud peut surveiller son environnement et réagir si nécessaire en envoyant les informations collectées à un ou plusieurs points de collecte à l'aide de connexions sans fil.

1.5.2 Architecture des RCSF

La figure 1.10 montre l'architecture typique d'un réseau de capteurs sans fil. Ils sont construits autour des quatre entités principales suivantes [37] :

- **Capteur (sensor)** : Comme son nom l'indique, il est chargé de mesurer des valeurs liées à son environnement.
- **Agrégateur (aggregator)** : Il est chargé d'agréger les messages reçus de plusieurs capteurs, puis de les envoyer au puits en un seul message. Le but principal de cette opération est de limiter le trafic sur le réseau, prolongeant ainsi la durée de vie globale du réseau de capteurs.
- **Le puits (sink)** : Le puits est le nœud final du réseau. C'est lui qui envoie toutes les valeurs mesurées par le réseau. Il peut arriver qu'il y ait plusieurs puits sur le même réseau de capteurs.
- **Passerelle (gateway)** : Une passerelle est un appareil spécial avec deux interfaces réseau. Il connecte le réseau de capteurs sans fil à un réseau plus traditionnel, généralement Internet. En fait, les réseaux de capteurs ne sont généralement utilisés que pour remonter les résultats de mesure, et les applications qui traitent ces informations sont exécutées sur la machine de l'utilisateur final.

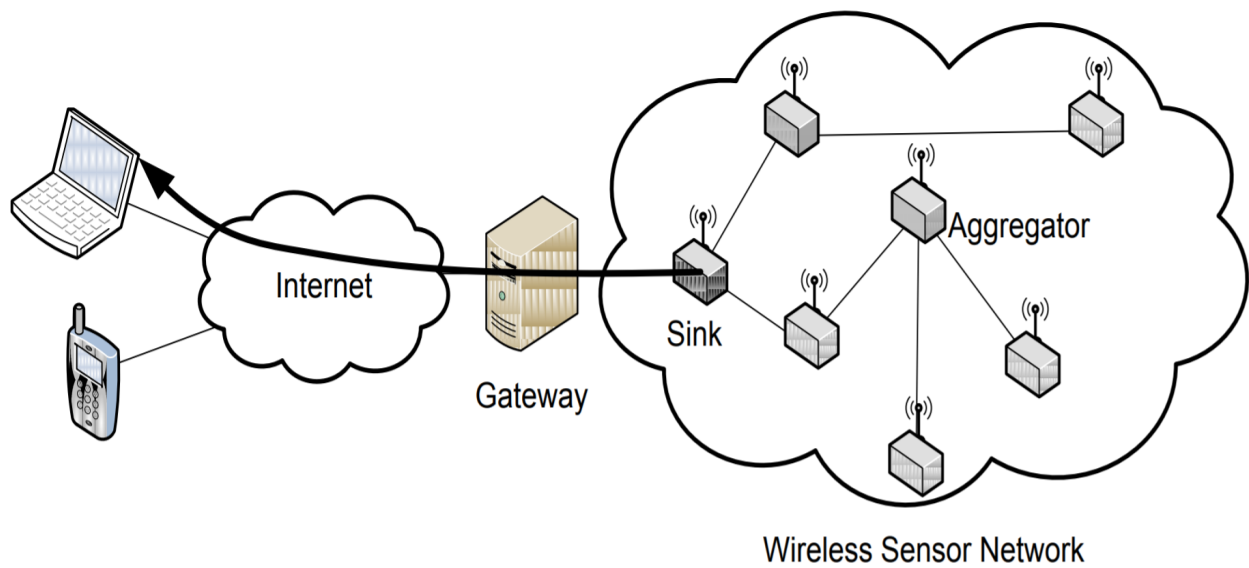


FIGURE 1.10 – Architecture classique d'un réseau de capteurs sans fils [37]

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentée le concept de l'industrie 4.0, ses origines et les normes de communication sans fils appliquées dans l'environnement industriel. Ensuite, nous avons décrit l'internet des objet, son architecture, ses protocoles de fonctionnement et les réseaux dédiés a ce dernier. Finalement, nous avons expliqué le déploiement d'internet des objets dans le domaine industriel. Dans le chapitre suivant, nous abordons le mécanisme IEEE 802.15.4.

CONTEXTE GÉNÉRAL

2.1 Introduction

IEEE 802.15.4 est un réseau personnel sans fil à faible débit qui définit la couche physique et la couche MAC (*Medium Access Control*) utilisé par de nombreux protocoles IdO. De nombreuses études ont constaté que la couche MAC de l'IEEE 802.15.4 comporte un certain nombre de limites (telles qu'une faible fiabilité de communication et aucune protection contre les interférences) qui le rendent inadapté aux applications ayant des exigences strictes en termes de latence, fiabilité. Afin de surmonter ces limites, l'IEEE a mis en place en 2008 un groupe de travail (nommé 802.15 Task Group 4e) dans le but d'améliorer et d'ajouter des fonctionnalités à la couche MAC d'IEEE 802.15.4, afin de répondre aux nouveaux besoins des applications embarquées. Le résultat final a été la publication de la norme 802.15.4e en 2012. La norme IEEE 802.15.4e améliore l'ancienne norme en introduisant de nouveaux mécanismes tels que l'accès en slots de temps, la communication multicanal et le saut de canal. Plus précisément, il définit cinq protocoles MAC (LLDN (*Low Latency and Deterministic Networks*), DSME (*Deterministic Multi Channel Adaptation*), TSCH (*Time Slotted Channel Hopping*), AMCA (*Asynchronous Multi Channel Adaptation*), BLINK (*Radio Frequency Identification Blink*)).

Dans ce chapitre, après une description générale du modèle OSI (*Open Systems Interconnection*) et du standard IEEE 802.15.4, nous consacrons une attention particulière à la description du comportement MAC IEEE 802.15.4e TSCH, et à la présentation d'un algorithme d'allocation de cellules optimisé TSCH appelé OSCAR (*Optimized Scheduling Cell Allocation Algorithm*).

2.2 Modèle OSI

Tout d'abord, il est important d'introduire le modèle OSI suivant, qui est un modèle de référence de la façon dont le système communique sur le réseau.



FIGURE 2.1 – Pile de protocoles OSI

Dans un réseau, tous les appareils (nœuds) utilisent ces couches pour communiquer entre eux. Chaque couche sert de couche au-dessus d'elle, qui à son tour sert de couche au-dessus d'elle-même. Par exemple, lorsque des informations sont échangées entre nœuds, le fonctionnement de processus est comme suit : le flux de données circule dans la couche machine qui envoie le message, puis se propage dans le réseau, et enfin dans la couche récepteur.

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les couches les plus importantes sur lesquelles seront accentués les efforts sont la couche MAC et la couche réseau où a lieu le routage [5].

2.2.1 Couche MAC

La conception du protocole MAC au niveau de la couche liaison de données est un défi majeur. La zone sans fil est une ressource partagée, et les nœuds dans la même portée de communication peuvent provoquer des interférences lorsqu'ils tentent d'accéder au support en même temps. Par conséquent, le protocole de contrôle d'accès au support (MAC) au niveau de la couche liaison est responsable de la régulation de l'accès au support. Il détermine quel nœud peut accéder au support, quand et sur quel canal.

Le protocole MAC peut adopter un mécanisme d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) basé sur le temps, ou un procédé d'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA)

basé sur la fréquence, ou basé sur un code après accès multiple par répartition de code (CDMA). Il peut également être basé sur un accès aléatoire utilisant des algorithmes de détection de média à accès multiple (CSMA), ou même une combinaison de certains de ces schémas d'accès au média [38].

2.2.2 Couche réseau

L'objectif principal de la couche réseau est de transmettre les paquets de données correctement et efficacement entre l'émetteur et le récepteur. Il joue un rôle important dans la transmission des données et est responsable de la construction des chemins entre les nœuds du réseau. Dans un réseau de capteurs sans fil, la couche réseau est représentée par un protocole de routage. Le protocole de routage doit construire un réseau et guider les nœuds pour router leurs paquets de données vers les nœuds de destination et en particulier vers le sink en cas de profil de trafic de données convergeant. Le protocole de routage utilisé peut être différent selon les besoins de l'application [38].

2.3 Trafic convergeant dans les réseaux de capteurs sans-fil

La convergence fait référence à un modèle de communication qui transmet des flux de données d'un groupe de nœuds à un seul nœud du réseau. Plusieurs applications de réseaux de capteurs nécessitent le comportement de convergence de la collecte de données, où les nœuds doivent constamment percevoir ce qui se passe dans leur environnement (surveillance des incendies, surveillance de l'activité sismique, mesure de la température, surveillance de la pollution). Lors de la convergence du trafic, les données collectées sur l'ensemble du réseau sont transmises par le nœud au sink. Dans cette transmission, plusieurs nœuds doivent utiliser une communication multi-sauts pour transmettre leurs données, car ils sont hors de portée du sink. En conséquence, ces réseaux souffrent de graves problèmes de congestion du trafic, en particulier au niveau du sink [39]. La figure 2.2 montre un exemple de transmission de données convergée.

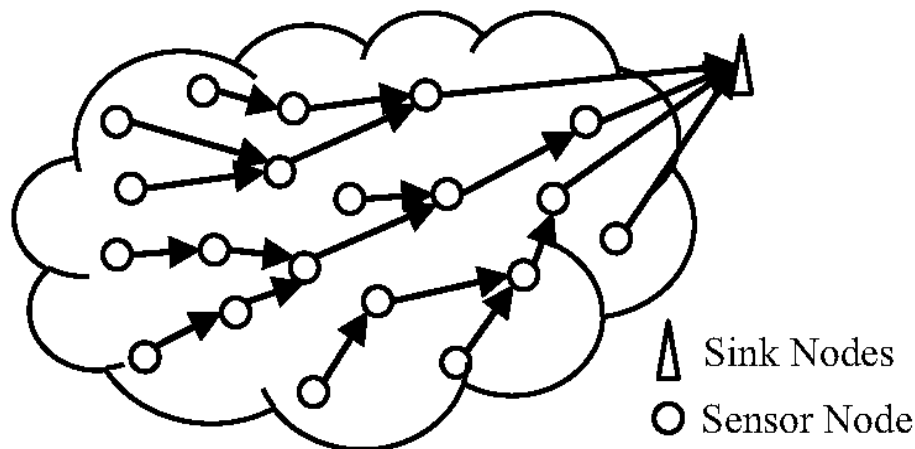


FIGURE 2.2 – Exemple de réseau de capteurs Sans-Fil avec un trafic convergeant [40]

2.4 Standard IEEE 802.15.4

La norme IEEE 802.15.4 est un protocole de communication défini par IEEE pour les réseaux sans fil bas débit et basse consommation d'énergie appelé LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*). Il spécifie et normalise la couche physique et la sous-couche MAC des équipements de réseau.

Le standard IEEE 802.15.4 a été introduit en 2003 et révisé en 2006, 2011, 2015 et plus récemment en 2020. Les versions les plus récentes intègrent le saut de canal synchronisé dans la couche MAC sous la norme IEEE 802.15.4e. La norme IEEE 802.15.4 adopte deux formes de topologies, maillé et en étoile comme le montre la figure 2.3 . Elle est gérée par le groupe de travail IEEE 802.15 et constitue la base des technologies Zigbee, ISA100.11a, WirelessHART et Thread. Chacune d'elles élargit encore la norme en développant les couches supérieures qui ne sont pas définies dans IEEE 802.15.4 [38].

2.4.1 LR-WPAN

Au cours des dix dernières années, afin de répondre aux exigences de qualité de service de la communication industrielle, plusieurs normes de communication sans fil à faible puissance ont été définies [41]. IEEE 802.15.4 [42] est une norme si populaire, qui a été publiée pour la première fois en 2003 pour une utilisation dans WPAN (*Wireless Personal Area Networ*). Ce protocole ne définit que la couche physique et la couche d'accès au canal de communication, et certaines propositions, comme les protocoles ZigBee [43] ou RPL [44], ont établi une pile de protocoles de communication.

Dans la norme IEEE 802.15.4 [45], les appareils peuvent être divisés en appareils à fonction complète FFD (*Full Function Device*) et appareils à fonction réduite RFD (*Reduced Function Devices*) :

- Nœud de routeur FFD, utilisé pour transmettre des données via un routage multi-sauts. Ces nœuds coordonnent également toutes les autres fonctions du réseau.
- Nœud terminal RFD, impliquant une série de protocoles légers et économiques.

Le coordinateur PAN est un FFD, agissant en tant que contrôleur maître, et d'autres périphériques peuvent s'y associer. Il est responsable de la synchronisation horaire de l'ensemble du réseau. Parfois, FFD peut également agir en tant que coordinateur, fournissant des services de synchronisation et de routage locaux pour ses voisins. Chaque coordinateur doit être associé à un coordinateur PAN, et s'il ne trouve pas d'autres réseaux à proximité, ce dernier forme son propre réseau. Le dispositif à fonction réduite (RFD) est généralement le point de terminaison d'un réseau IEEE 802.15.4. RFD convient aux applications extrêmement simples, telles que les interrupteurs d'éclairage ou les capteurs infrarouges passifs, qui sont généralement synchronisés avec le coordinateur et n'ont pas de fonction de routage [46].

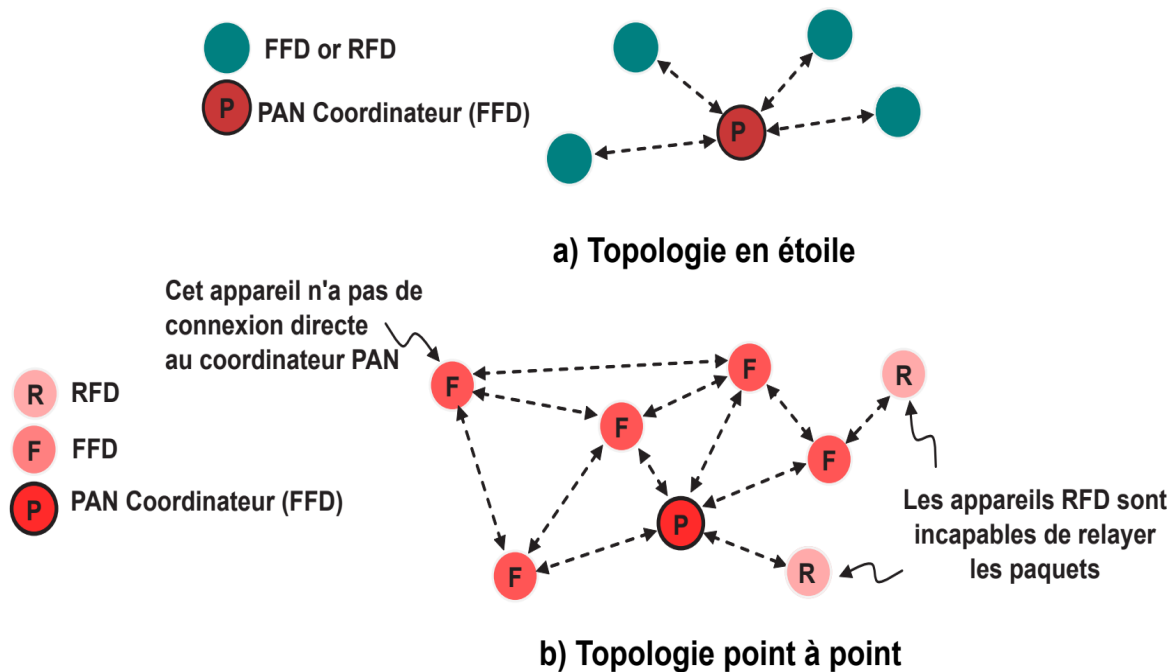


FIGURE 2.3 – Topologies 802.15.4 [46]

Les appareils conformes à la norme IEEE 802.15.4 peuvent utiliser l'une des trois bandes de fréquences possibles pour le fonctionnement comme le montre la figure 2.4 :

- Bande de fréquence 868 MHz, allant de 868,0 à 868,6 MHz pour l'espace européen : canal unique, débit de 20 données kbit/s est disponible.
- Bande de fréquence 915 MHz, comprise entre 902 et 928 MHz utilisée en Amérique du Nord et dans le Pacifique : 10 canaux avec un débit de 40 kbit/s sont disponibles.
- La bande de fréquence 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific Medical*) est étendue de 2400 à 2483,5 MHz, et qui est d'utilisation mondiale : 16 canaux avec un débit de 250 kbit/s sont disponibles.

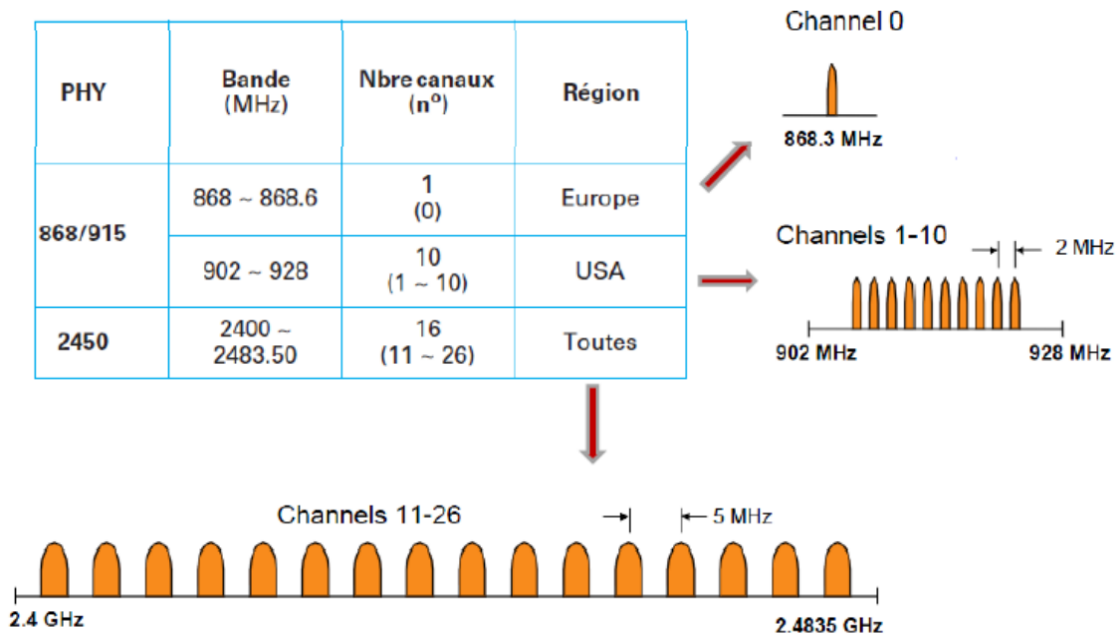


FIGURE 2.4 – Bandes de fréquences de IEEE 802.15.4 [47]

2.4.2 Limitations

Les performances du protocole MAC 802.15.4 présentent de nombreuses limitations et lacunes, le rendant inadapté aux applications critiques qui ont des exigences strictes en termes de fiabilité, de latence, d'efficacité énergétique et d'évolutivité et fonctionnent généralement dans des environnements difficiles. Ces restrictions sont les suivantes :

- Fiabilité limitée.
- Délai non borné.
- Pas de technologie de saut de fréquence intégrée.
- Mauvaise gestion de l'énergie.

2.4.3 Évolution de la norme IEEE 802.15.4

La norme initiale IEEE 802.15.4-2003, approuvée en 2003, vise à définir la technologie spécifique de la norme. Elle a été modifiée et remplacée par la nouvelle norme publiée le 7 juin 2006, et proposait une sous-couche MAC et quatre couches PHY. IEEE 802.15.4-2006, qui a par la suite été révisé 3 fois, est toujours la seule base valide sur laquelle la révision est basée. Le tableau 2.1 résume les suggestions d'amélioration formulées par cet ensemble de normes.

Version d'IEEE 802.15.4	Détails et commentaires
IEEE 802.15.4-2003 [42]	Il s'agit de la première réalisation de la norme IEEE 802.15.4. Elle est conçue pour deux couches physiques différentes : une pour les bandes de basses fréquences de 868 et 915 MHz, l'autre pour les 2.4 GHz.
IEEE 802.15.4-2006 [45]	L'obtention de la norme IEEE 802.15.4 en 2006 a permis d'améliorer le débit des bandes de fréquences basses. Elle a mis à jour la couche PHY à 868 et 915 MHz. Par conséquent, elle définit quatre nouveaux schémas de modulation, dont trois sont utilisés pour les bandes de fréquences basses et un est utilisé pour 2.4 GHz.
IEEE 802.15.4a-2007 [48]	Cette version de la norme IEEE 802.4 définit deux nouvelles couches PHYs. L'une utilise la technologie UWB (<i>Ultra Wide Band</i>) et l'autre CSS (<i>Chrip Spread Spectrum</i>) à 2.4GHz.
IEEE 802.15.4c-2009 [49]	La version "c" a été mise à jour pour : 2.4GHz, 868 et 915 MHz, UWB et la bande Chinoise 779-787 MHz.
IEEE 802.15.4d-2009 [50]	2.4GHz, 868MHz, 915MHz et la bande japonaise 950-956MHz.
IEEE 802.15.4e-2012 [51]	Cette réalisation a défini des nouveaux mécanismes à la sous couche MAC de IEEE 802.15.4.

TABLEAU 2.1 – Les modifications IEEE 802.15.4 [47]

2.5 Standard IEEE 802.15.4e

La norme IEEE 802.15.4 était à l'origine conçue pour les applications qui n'ont pas d'exigences particulières en termes de latence, de fiabilité, d'efficacité énergétique et d'évolutivité. Pour remédier à ces limitations, l'organisation IEEE a créé un groupe de travail appelé 802.15 Task Group 4e en 2008, qui a été approuvé en 2012 en tant qu'amendement à l'ancienne norme IEEE 802.15.4. La norme IEEE 802.15.4e ne fournit que l'amélioration de la sous-couche MAC, elle conserve la couche physique et la couche de sécurité. Il améliore et augmente les fonctions de la norme IEEE 802.15.4 précédente, introduisant ainsi cinq mécanismes MAC. Il améliore sa flexibilité en s'adaptant à différents types d'exigences application. IEEE 802.15.4e a apporté les améliorations suivantes [52] :

- **Low Energy Level (LE)** : Ce mécanisme convient aux applications inefficaces L'énergie prime sur le retard. Cela permet au nœud de fonctionner avec des cycles très faibles (1% ou moins). Ce mécanisme est très important dans l'environnement de l'Internet des objets, car la conception du protocole suppose que le nœud capteur est toujours actif.
- **information element (IE)** : C'est un mécanisme extensible pour échanger des informations au niveau de la sous-couche MAC.
- **Enhanced Beacons (EB)** : Ce sont des extensions du cadre de balise 802.15.4 offrent une plus grande flexibilité pour le protocole MAC. Ils permettent de créer des frameworks spécifiques à l'application, y compris IE associé.
- **Les trames multi-usage** : Elles sont basés sur IE et fournissent des formats de trame flexibles pouvant gérer plusieurs opérations MAC.
- **Mesure des performances MAC** : Il s'agit d'un mécanisme qui fournit des informations sur la qualité du canal à la couche réseau et aux couches supérieures afin de prendre les décisions appropriées. Par exemple, le protocole IP peut mettre en œuvre une segmentation dynamique des datagrammes en fonction de l'état du canal.
- **Association rapide (FastA)** : Le processus d'association 802.15.4 introduit un délai important pour économiser de l'énergie. Pour les applications critiques, la latence prime sur l'efficacité énergétique. Par conséquent, le mécanisme FastA permet aux nœuds de s'associer en peu de temps.

2.5.1 Mécanismes MAC d'IEEE 802.15.4e [46]

Dans cette section, nous décrivons le mécanisme MAC proposé par la norme. IEEE 802.15.4e. IEEE 802.15.4e décrit 5 modes MAC différents : RFID (*Radio Frequency Identification*), AMCA (*Asynchronous Multi Channel Adaptation*), DSME (*Deterministic Synchronous Multichannel Extension*), LLDN (*Low Latency and Deterministic Networks*) et TSCH (*Time Synchronous Channel Hopping*). Chaque mode prend en charge des domaines d'application spécifiques [53] :

- **RFID** : Spécifie le mode MAC appelé BLINK, il permet à l'appareil de transmettre son ID, son identifiant unique et d'autres données utiles à l'appareil avec lequel il communique.
Les appareils peuvent se connecter les uns aux autres sans aucune association ou reconnaissance préalable. Les trames BLINK ne peuvent être utilisées qu'à des fins de transmission et coexistent avec d'autres appareils sur le réseau. Il est destiné aux applications telles que la localisation et le suivi des personnes.
- **AMCA** : Le mode AMCA peut être utilisé pour les applications de réseau de capteurs denses. Il peut être activé pour le mode d'activation sans balise du réseau IEEE 802.15.4e.
- **DSME** : Vise à améliorer le mode Beacon et soutenir les applications industrielles et commerciales, avec des contraintes strictes en rapidité et fiabilité [47].
- **LLDN** : Il est conçu pour les réseaux à canal unique et à saut unique. Il est adapté à l'automatisation industrielle qui nécessite une très faible latence.
- **TSCH** : Conçu pour améliorer le modèle non-Beacon de l'IEEE 802.15.4. Une attention particulière sera portée à ce mode et fera l'objet de la prochaine section.

Dans le tableau 2.2, nous avons présenté une comparaison entre les cinq mécanismes MAC proposés par l'amendement IEEE 802.15.4e

Modes MAC	RFID	AMCA	DSME	LLDN	TSCH
Évolutivité	-	Oui	Oui	Non	Oui
Fiabilité	Moyen	Moyen	Élevé	Très élevé	Très élevé
Efficacité énergétique	Élevé	Moyen	Dépend du nombre de nœuds	Plus élevé que DSME	Plus élevé que DSME
Accès multicanal	Non	Oui	Oui	Non	Oui
Applications possibles	Suivi et identification	Applications non sensibles au temps avec des exigences d'évolutivité élevées	Applications à temps critique à haute évolutivité	Automatisation industrielle nombre fixe de nœuds	Applications temps critique avec des exigences d'efficacité énergétique

TABLEAU 2.2 – Modes de comportement MAC du standard IEEE 802.15.4e [38]

2.6 Time Slotted Channel Hopping

2.6.1 Structure de la slotframe

Dans TSCH, le concept de supertrame utilisé dans les normes DSME, LLDN et le standard IEEE 802.15.4 a été remplacé par le concept de slotframe. Une slotframe est composée de périodes de communication définies entre des nœuds appelés slots de temps. Une slotframe se répétera automatiquement au fil de temps pour former un calendrier de communication. La figure 2.5 montre un exemple d'une structure de supertrame TSCH avec trois slots de temps.

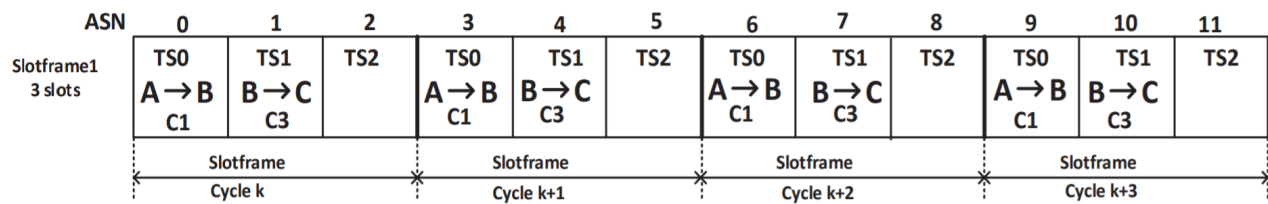


FIGURE 2.5 – Structure d'une supertrame TSCH avec trois slots de temps [54]

Dans cet exemple, la slotframe se répète tous les trois slots de temps. La longueur de chaque slot de temps est suffisante pour qu'une paire de nœuds échange une trame de données de la taille maximale et un acquittement possibles. Si un *ACK* est requis et qu'il n'est pas reçu dans un délai prédéterminé, la retransmission n'aura lieu que dans le prochain slot de temps dédié à la même paire de nœuds émetteurs/récepteurs, et ceci sur n'importe quelle trame slotframe. [51, 55].

2.6.2 Saut de canal [53]

La communication multi-canal de mode TSCH repose entièrement sur les sauts de canal. Le mode TSCH peut utiliser jusqu'à 16 canaux de communication définis par un décalage de canal (appelé *channel offset*). Dans le mode TSCH, le lien de communication entre une paire de nœuds est défini par le couple $[n, \text{channel offset}]$. Il s'agit d'une affectation de la communication par paire des slot de temps n et de channel offset consécutifs. La fréquence f utilisée pour la communication peut être définie comme suit :

$$f = F[(ASN + \text{channelOffset}) \% N_{\text{channels}}] \quad (2.1)$$

où l'ASN est un compteur qui représente le nombre total de slot de temps écoulé depuis le déploiement du réseau. Il est incrémenté après chaque slots de temps et est partagé par tous les nœuds du réseau. N_{channels} est la longueur de la table `HoppingSequenceList` contenant tous les canaux disponibles, en d'autres termes, N_{channels} est le nombre de fréquences disponibles. F peut être implémenté en tant que table de recherche. Le mode TSCH permet d'établir deux types de

liens, un lien partagé et un lien dédié. Lorsque le lien est dédié, une seule paire de nœuds peut communiquer. Dans le cas d'un lien partagé, plusieurs nœuds peuvent transmettre des données. La figure 2.6 montre un exemple d'ordonnancement TSCH.

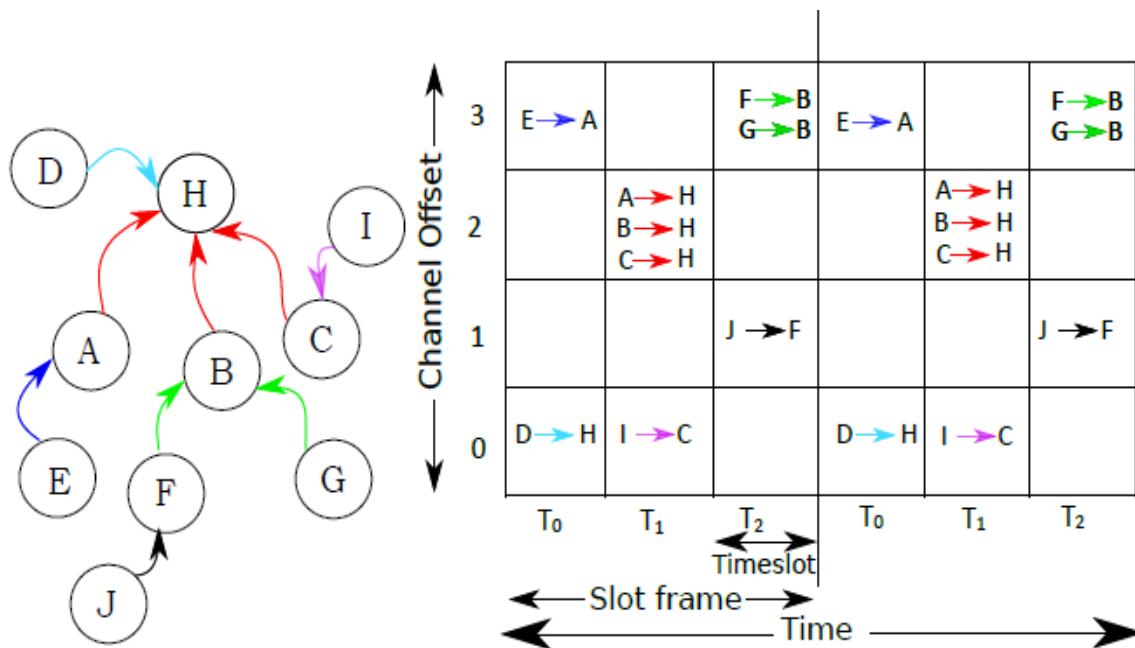


FIGURE 2.6 – Exemple d'un calendrier TSCH [54]

2.6.3 Formation du PAN

Le mode TSCH peut être utilisé dans n'importe quelle topologie de réseau (telle qu'étoile, arbre, maillé) et il prend en charge deux types de nœuds, tels que RFD et FFD comme dans la norme IEEE 802.15.4. Une fois le réseau établi, le coordinateur PAN diffusera un EB (Enhanced Beacon) en réponse à la demande MLME BEACON.request de la couche supérieure. Les nœuds souhaitant se connecter avec le coordinateur PAN doivent se trouver dans la portée de diffusion. Le EB contient des informations sur le temps, le saut de canal, les slots de temps et les liens initiaux. Les nœuds souhaitant rejoindre le réseau effectuent une analyse active ou passive après avoir reçu la demande MLME-SCAN.request de la couche supérieure. Une fois que le nœud entend le EB, il génère une indication MLME BEACON-NOTIFY.request pour les couches supérieures. Par conséquent, ce dernier initialise la slotframe et les informations des liens initiaux disponibles dans la EB. Une fois le nœud synchronisé avec le réseau, la couche supérieure programme le nœud en mode TSCH en envoyant une requête TSCH MODE.request [42].

2.7 Algorithme d'allocation de cellules optimisé TSCH (OSCAR)

2.7.1 Rang RPL

Le concept de rang introduit par le protocole de routage RPL (*Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks*) [44] est utilisé comme base d'OSCAR pour déterminer la distance par rapport à la racine. L'utilisation du rang dans les algorithmes OSCAR sera décrit dans les sous sections suivantes. Le protocole de routage RPL pour les réseaux LLN (*Low Power and Lossy Networks*) a été développé par le groupe de travail ROLL de l'IETF et publié sous le nom (RFC6550) [44]. RPL est essentiellement un protocole de routage vectoriel distant actif pour LLN basé sur IPv6. La topologie RPL adopte la structure DODAG (*Destination Oriented Direct Acyclic Graph*). À l'exception de la mémoire périphérique, le nombre de nœuds dans DODAG n'est pas limité. Généralement, la racine DODAG (*DODAG root*) correspond à un routeur frontière IPv6 (*Internet Protocol version 6*), qui connecte les nœuds au monde extérieur et peut recevoir des commandes de sa part pour gérer les données collectées. Chaque nœud est associé à un rang, c'est-à-dire que sa distance à la racine utilise une fonction de coût (plus le nœud est proche de la racine, plus son rang est bas). Le nœud envoie le paquet de données à la racine en transférant le paquet de données à un nœud voisin de rang inférieur.

L'établissement et la maintenance du DODAG sont assurés par le message de contrôle DIO (*DODAG Information Object*) diffusé à l'aide du temporisateur de maintien. Le paquet DIO contient des informations telles que des indicateurs utilisés pour calculer le coût du chemin. Initialement, seule la racine DODAG faisait partie de la topologie RPL active. Par la suite, le message DIO diffuse périodiquement des paramètres de configuration, tels que le DODAG ID et son rang dans son voisinage. Une fois qu'un nœud reçoit plusieurs DIO de différentes sources, il choisira l'un d'entre eux comme nœud parent préféré (selon le rang), qui agit également comme le prochain bond pour atteindre la racine DODAG.. Par la suite, lorsqu'un nouveau nœud entre dans le réseau à partir du nœud d'origine désigné comme racine, il obtient des informations de voisin via des messages DIO. Parmi les nœuds déjà présent, un nœud est sélectionné comme nœud parent et la valeur RANK du nouveau nœud est calculée en fonction de la valeur RANK de ce nœud parent.

RPL définit également DAO (*Destination Advertisement Object*), qui est un message ascendant qui permet aux nœuds d'annoncer leurs préfixes pour établir des routes de liaison descendante. Par conséquent, par exemple, lorsque le nœud parent préféré est modifié en raison d'un changement de lien, le nœud envoie un DAO par la voie ascendante au nouveau nœud parent préféré pour configurer une nouvelle route de liaison descendante. Pour garantir la réception de message, le nœud parent envoie un DAO Ack au nœud enfant.

La figure 2.7 montre les étapes de construction d'un DODAG :

- Le nœud racine diffuse un message de type DIO à ses voisins qui vont à leur tour propager leur propre DIO.
- Les nœuds environnants commencent à participer au DODAG en construction.
- Lorsque tous les nœuds sont engagés, le DODAG est construit.

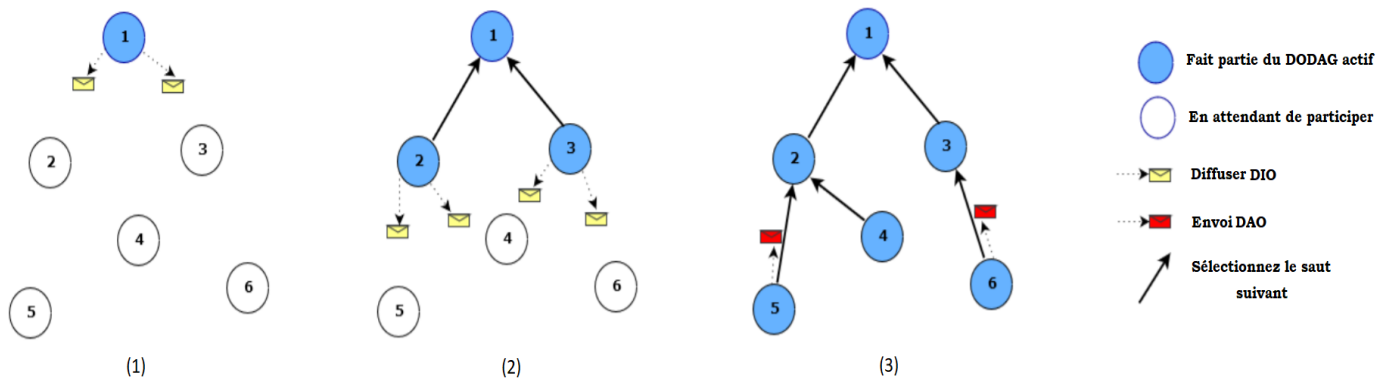


FIGURE 2.7 – DODAG Construction [56]

RPL met en place plusieurs indicateurs de routage et modèles de trafic pour répondre aux normes de consommation d'énergie et de fiabilité, et est conçu pour fonctionner sous des contraintes de mémoire strictes.

2.7.2 Conception

OSCAR est un nouvel algorithme d'allocation de cellules TSCH d'ordonnancement autonome basé sur l'algorithme Orchestra. OSCAR diffère d'Orchestra par la façon d'attribution des slots en fonction de l'emplacement des nœuds par rapport à la racine. Oscar propose 2 algorithmes, le but du premier est d'allouer des slots aux nœuds en fonction de leurs besoins. Le deuxième algorithme sert à réduire les slots alloués aux nœuds inactifs. Plus de détails seront présentés dans les sous-sections suivantes.

Algorithme 1 : Répartition optimisée de l'allocation de cellules

Nous savons que les nœuds proches de la racine présentent un trafic élevé. Dans cette vision, l'algorithme propose de gérer le nombre de slots de temps alloués à chaque nœud en fonction du rang. Pour cela, OSCAR a utilisé RPL pour déterminer le rang de chaque nœud à l'aide d'une fonction objective (OF).

OSCAR est caractérisé par la classification des nœuds en 6 classes selon leur rang (le rang de la racine égale à 0). Chaque nœud va attribuer des classe ID, représentant la couche qu'il occupe. L'ID de la classe varie de 0 à 5, est défini en fonction du rang. En effet, plus l'ID de la classe augmente, plus la distance augmente. La démarche d'allocation de slots se fait comme suit :

Il s'agit d'un mécanisme de répartition des slots de temps sur les six prochaines slotframes. Si le noeud appartient à la classe 0, il aura six slots sur les six prochaines slotframes, la classe 1 aura 5 slots et ainsi de suite jusqu'à la dernière classe qui ne disposera que d'un seul slot. Quand le rang change, OSCAR alloue ou désalloue un slot selon la nouvelle valeur de ce rang. A chaque fois le noeud s'éloigne de la racine, moins de slot seront alloués. En approchant, il alloue plus. L'algorithme d'ordonnement se produit tous les cinq paquets.

Algorithme 2 : Mécanisme de réduction de slots alloués à un noeud inactif

Chaque noeud dans un système possède un cycle de service. Chaque intervalle se compose de slots de temps de sommeil et de réveil. Dans le cas de sommeil le noeud atteint sa radio et dans le cas de réveil le noeud allume sa radio pour transmettre ou recevoir un paquet.

L'algorithme 2 propose une méthode pour ajuster le cycle de service radio de chaque noeud. Lorsque un noeud inactif a un rang important, l'algorithme diminue les slots alloués en déclassant le noeud. Par la suite, une fois que l'activité reprend sur ce noeud, le nombre de slot initiale calculé sur la base du rang est rétabli. Ce processus se fait à l'aide d'un monitor qui se déclenche toutes les 10 secondes pour poursuivre l'activité de chaque noeud. Lorsque le noeud n'a pas d'activité l'algorithme lui alloue moins de slots selon sa nouvelle classe. L'objectif de ce mécanisme est de réduire la consommation énergétique du réseau.

2.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons tous d'abord présenté les fondements de base du standard IEEE 802.15.4 et les limitations de la couche MAC définie dans ce dernier. Ensuite, nous avons décrit le mécanisme IEEE 802.15.4e TSCH. Enfin, nous avons présenté l'algorithme d'allocation de cellules optimisé TSCH (OSCAR).

Dans le chapitre suivant, nous dressons un état de l'art des travaux de recherche de la littérature menés autour de ce mécanisme, ainsi que la limitation de l'algorithme d'OSCAR.

Synthèse de l'ensemble des travaux existants sur le mode TSCH et Proposition

3.1 Introduction

Depuis l'avènement de la norme IEEE 802.15.4e, plusieurs chercheurs ont étudié les performances de ses trois protocoles MAC et proposé diverses améliorations, on cite : LLDN, DSME et TSCH.

Dans cette section, nous examinons les travaux les plus pertinents concernant TSCH, les algorithmes d'ordonnancement sont les composants majeurs de TSCH. ils peuvent être classés en trois groupes principaux : planification centralisée [57–59], distribuée [60–63] et autonome [1, 64, 65]. Dans ce qui suit, nous allons passer en revue un état de l'art relatif à ces domaines.

3.1.1 Ordonnancement centralisé

Les auteurs de [57] ont proposé le TASA (*Traffic Aware Scheduling Algorithm*), qui est une méthode centralisée dans laquelle le plan est construit par un seul nœud. Ce plan crée un modèle temps/fréquence basé sur le graphique suivant la topologie du réseau et la charge de trafic de chaque nœud, tout en réduisant le délai et le cycle de service radio.

Les auteurs de [58] ont proposé un autre ordonnancement centralisé de diffusion de données brutes par fusion (convergecast), appelé MODESA (*Multichannel Optimized Delay Time Slot Assignment*), qui prend en compte la disponibilité de plusieurs canaux pour réduire le temps de cycle TDMA. Il trie les nœuds en fonction de leur priorité, et la priorité la plus élevée correspond au plus grand nombre de paquets de données restant dans la mémoire tampon du nœud.

Les auteurs de [59] ont proposé l'algorithme CLS (*Centralized Link Scheduling*) qui utilise un nombre minimum de messages de contrôle centralisé pour construire un programme multi-sauts efficace car il alloue et désalloue des tranches de temps sans avoir à réorganiser l'ensemble du

programme à chaque fois. CLS se concentre sur la réduction de l'écoute inactive tout en répondant aux exigences de bande passante du réseau.

3.1.2 Ordonnancement distribué

Les auteurs de [60] ont proposé le DeTAS (*Decentralized Traffic Aware Scheduling*). C'est la version distribuée de la méthode TASA. Dans DeTAS, ils ont supposé que tous les dispositifs sont synchronisés dans le même slotframe. Chaque nœud doit connaître la quantité de trafic qu'il recevra de ses fils et la quantité de trafic qu'il enverra au parents. Il utilise la signalisation de voisin à voisin afin de recueillir des informations sur le réseau et le trafic. DeTAS introduit une légère surcharge en définissant des trames MAC de signalisation, et aussi il garantit des performances élevées en termes de rapport cyclique, de délai de bout en bout et de rapport de perte de paquets (*Packet Loss Ratio*) [60].

Les auteurs de [61] ont proposé Wave, un autre algorithme de programmation distribué qui planifie les nœuds en vagues successives. Dans chaque onde, chaque nœud ayant un paquet à transmettre se voit attribuer un créneau horaire et un canal. Le nœud sink envoie un message à ses enfants pour déclencher le calcul de la première vague. La particularité de cet algorithme est qu'il minimise la taille slotframe requise pour la convergecast. Chaque slotframe est divisée avec une unité appelée Wave et génère des ondes à plusieurs reprises pour former un programme pour que tous les nœuds du réseau transmettent des paquets générés à intervalles réguliers au sinks.

DIVA, un algorithme distribué de programmation de divergecast, est présenté dans [62]. C'est un algorithme de programmation complètement distribué pour le trafic divergecast où les nœuds quittent le trafic vers tous les nœuds voisins par opposition à convergeant où les nœuds de sortie concentrent le trafic vers le nœud racine. Les connexions aux nœuds voisins sont établies en fonction d'opportunités aléatoires indépendantes du taux de trafic réseau à chaque nœud.

Dans [63], les auteurs ont introduit l'algorithme DeAMON, qui est un protocole de planification multi-sauts adaptatif décentralisé pour les réseaux sans fil 6TiSCH. Cette programmation distribuée pour les applications industrielles de mesure et de contrôle ne fournit des solutions que pour le trafic ascendant et ne tient pas compte du trafic descendant. En allouant de manière dynamique et robuste les emplacements de sauvegarde, DeAMON atteint une fiabilité élevée.

3.1.3 Ordonnancement Autonome

Le champ de planification autonome de TSCH a débuté avec la publication d'Orchestra [64]. Orchestra est une solution pour la programmation autonome de TSCH dans les réseaux RPL. Orchestra fonctionne sans entité centrale de programmation ni de négociation, et prend en charge le trafic d'accès aléatoire de faible puissance. L'idée clé est de fournir un ensemble de slots pour différents plans de trafic, et de définir les slots de telle sorte qu'elles puissent être automatiquement

installées/supprimées que la topologie RPL évolue. Ils ont implémenté Orchestra dans Contiki et effectué une évaluation approfondie en simulation et sur deux bancs d’essai différents. Ils ont démontré le côté pratique d’Orchestra et sa capacité à atteindre le plus haut taux de livraison, tout en obtenant un intéressant équilibre latence-énergie.

D’autre part, ALICE [65], qui s’appuie également sur Orchestra, attribue une unité unique à chaque lien de sens du trafic au lieu d’attribuer une unité à chaque nœud.

Les auteures de [1] ont proposé OSCAR, un nouvel algorithme d’allocation de cellules TSCH à ordonnancement autonome basé sur l’algorithme Orchestra. Cette nouvelle conception diffère d’Orchestra en ce qu’OSCAR alloue des slots en fonction de la position du nœud par rapport à la racine. Le but de cet algorithme est d’allouer des créneaux temporels aux nœuds en fonction de leurs besoins. L’algorithme gère le nombre de tranches de temps allouées à chaque nœud en utilisant la valeur de rang décrite par le protocole de routage RPL. L’objectif est que plus un nœud est proche de la racine, plus il dispose d’intervalles de temps pour maximiser les opportunités de transmission. Pour éviter une consommation excessive, OSCAR a mis en place un mécanisme pour ajuster la période de service radio de chaque nœud en réduisant les tranches de temps allouées aux nœuds inactifs, quelle que soit leur localisation dans le réseau.

le tableau 3.1 ci dessous présente une comparaison entre l’ordonnancement d’Orchestra et d’OSCAR :

Approche	Redistribution de cellules	S’adapter au trafic	Domaine d’application	Commentaires
Orchestra	χ	χ	Général	Avantages : faible niveau de file d’attente. Inconvénient : planification instable forte probabilité de provoquer une collision.
OSCAR	✓	✓	Sensible au délai	Avantages : très faible latence combinée a une faible perte d’énergie lors de trafic intense de file d’attente. Inconvénient : consommation d’énergie.

TABLEAU 3.1 – Évaluation qualitative des approches d’ordonnancement TSCH autonomes [38]

3.2 Limitations de l’algorithme OSCAR

Actuellement, l’ordonnancement TSCH ne prend pas en charge l’allocation de cellules en fonction de trafic et des besoins des nœuds. OSCAR a résolu ce problème avec une nouvelle conception d’attribution des slots en fonction de leur emplacement par rapport à la racine. Plus le nœud est proche de la racine, plus OSCAR lui alloue plus de slots. Cela se fait grâce a une classification

en utilisant le rang décrit par RPL. OSCAR a aussi pris en considération la surconsommation d'énergie par les nœuds. Il a décrit un mécanisme pour ajuster le cycle de service radio de chaque nœud, en réduisant les slots alloués aux nœuds inactifs quelle que soit leur position dans le réseau. Par exemple, si le nœud X qui se trouve dans la classe 1 n'a pas d'activité durant un laps de temps, il est basculé en classe 2 puis en classe 3 ainsi de suite jusqu'à la classe 5. OSCAR réserve un seul slot à ce nœud qui est inactif. La limitation est que OSCAR réserve des slots aux nœuds inactifs selon leur emplacement, malgré que ces nœuds ne nécessitent pas une réservation de slots jusqu'à ce qu'ils reprennent l'activité. Il faut donc essayer de minimiser au maximum la latence et l'énergie à ce niveau. En effet, les applications de surveillance et d'alerte ne se servent pas d'une meilleure allocation de cellule pour ignorer le problème de retard.

3.3 Proposition et validation

Dans ce travail, nous avons apporté une amélioration à l'algorithme OSCAR en levant cette limite. Une description détaillée de cette nouvelle version de OSCAR sera présentée dans ce chapitre.

Pour prouver la robustesse de notre proposition nous avons réalisé une analyse des performances ou la comparant aux algorithmes OSCAR et Orchestra. A cet effet, nous avons fait appel à l'outil de simulation COOJA sous le système d'exploitation CONTIKI OS. Ainsi, nous avons implémenté les trois algorithmes en questions et mené une série de simulation. Les résultats de simulation obtenus sont présentés et dictés dans ce chapitre.

3.4 Conception

Dans cette section, la conception détaillée et la mise en œuvre de la proposition d'amélioration de l'algorithme d'allocation de cellules de planification optimale OSCAR sont présentées. Pour concevoir et vérifier un protocole de communication, il est nécessaire de tester sa fonction dans différents scénarios. Idéalement, le protocole devrait être testé dans autant de scénarios et d'environnements que possible. Il y a trois façons de le faire : la simulation, le banc d'essai et le déploiement. Malheureusement, chaque solution a ses inconvénients. La simulation est rapide, flexible et ne nécessite pas de matériel, mais elle n'est généralement pas très précise. En revanche, bien que le banc d'essai soit statique, il a l'avantage de mieux refléter la réalité, notamment en termes de propagation radio et d'interférences. Enfin, le déploiement réel présente les mêmes avantages et inconvénients que le banc de test, mais avec un avantage supplémentaire qui est associé à une application spécifique. Cette section détaille notre système qui est basé sur OSCAR pour réduire au maximum le nombre de cellules allouées aux nœuds inactifs. L'analyse des performances de système proposé sera d'abord complétée à l'aide de la simulation. On a eu plusieurs difficultés

dans la partie simulation puisque le code source complet de l'algorithme OSCAR n'est pas disponible, et le simulateur contient pas le mécanisme d'Orchestra.

Chaque nœud du système fonctionne selon un cycle de service. Chaque intervalle se compose de plages horaires de sommeil et de réveil. Dans les créneaux horaires de sommeil, le nœud éteint sa radio et dans les créneaux horaires de réveil, le nœud allume sa radio pour transmettre ou recevoir des paquets. OSCAR met en place un mécanisme permettant d'ajuster le cycle de service radio de chaque nœud en réduisant les slots alloués aux nœuds inactifs quelle que soit leur position sur le réseau. Quand un nœud inactif dispose d'un bon rang, OSCAR diminue les slots alloués en déclassant le nœud petit à petit. Par exemple, si un nœud se trouve à la 2^{ème} classe, OSCAR lui réserve quatre slots, dans le cas où le nœud devient inactif pour un certain moment, il se bascule à une classe inférieure jusqu'à la dernière classe, donc son nombre d'allocations de slots devient un. L'idée ici est qu'en absence de données à recevoir ou transmettre, au lieu de réserver un certain nombre de slots au nœud selon sa nouvelle classe, on supprime complètement le nombre de slots alloués par ce nœud jusqu'à ce qu'il revienne à son état actif. Cela se fait à l'aide d'une fonction qui se trouve dans le fonctionnement TSCH qui s'appelle *tsch_remove_slotframe()*. Par exemple, dans le fonctionnement normal d'OSCAR, si le nœud *X* se trouvant à la classe 4 est inactif, il se dégrade vers la classe 5 et il alloue un seul slot au lieu de deux slots. Avec la nouvelle implémentation si le nœud *X* situé en classe 4 ne présente pas d'activités durant un laps de temps, il est basculé en classe 5, on ne lui attribue aucun slot jusqu'à ce qu'il revienne à son état initial (actif). Selon OSCAR, ce processus se fait à l'aide d'un moniteur qui se déclenche toutes les 10 secondes. Nous avons proposé de diminuer le déclencheur de 5 secondes en cas où le nœud inactif demande de rejoindre son état initial pour éviter la perte des paquets. L'objectif est de minimiser la consommation d'énergie de l'ensemble du réseau sous la contrainte que le délai de bout en bout attendu de chaque nœud soit également le plus faible possible.

Algorithm 1 Reschedule la cellule en fonction de la classe

Classes definition and initialization of the current class ;

Input: New Class

initialization ;

if *New_Class* = *Current_Class* **then**

| go to next section current section becomes this one

end

if *New_Class* < *Current_Class* **then**

| Allocation_more_slots();

else

| Reduce_more_slots();

end

if *New_Class* = *rank_class_max* **then**

| TSCH_schedule_remove_slotframe();

end

Algorithm 2 Réajustement du cycle de service

```
initialization ;  
while (1) do  
    Wait_5_seconds ;  
    if current_class  $\neq$  rank_class_max && no_packet_selected then  
        New_Class = Current_Class + 1 ;  
        Reschedule(New_Class) ;  
    end  
    if current_class = rank_class_max && no_packet_selected then  
        New_Class = rank_Class_max ;  
        Reschedule(New_Class) ;  
    end  
end
```

Le diagramme de flux présenté à la figure 3.1 illustre le processus de l’algorithme 2 afin de répondre aux exigences en termes d’énergie du réseau.

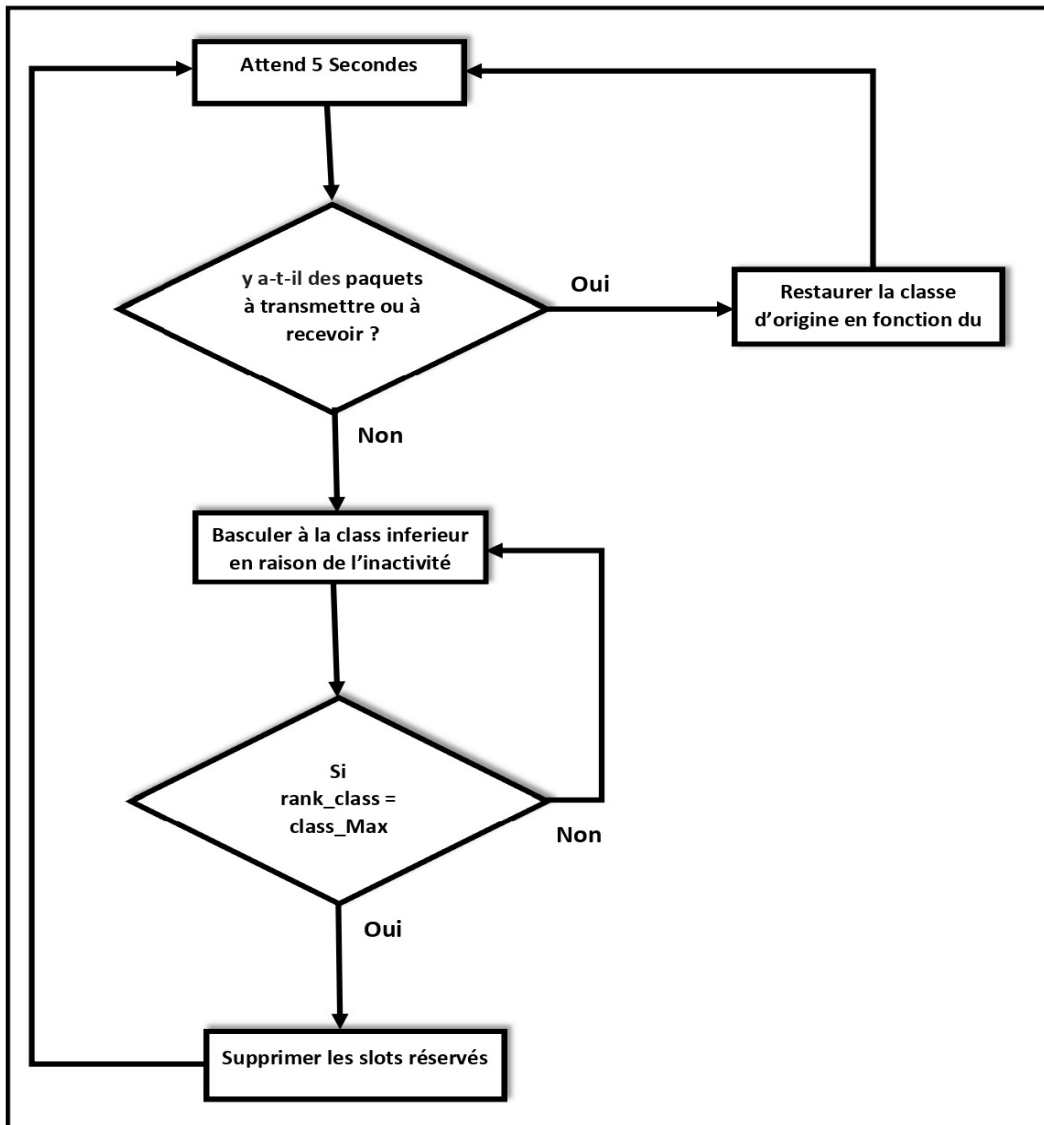


FIGURE 3.1 – Graphique de flux de conception de l’algorithme 2

3.5 Simulation

3.5.1 Métriques de performance

Nous utilisons les métriques qui seront décrites dans cette section pour comparer les performances d’OSCAR et d’Orchestra avec notre proposition. Les deux mesures considérées dans cette étude sont :

- **Latence (ou délai de transit, ou retard) :** est le délai de transmission d’une communication dans un réseau. Il fait référence au temps nécessaire à un paquet de données pour voyager de la source à la destination sur le réseau. Par conséquent, tout paquet de données transmis via le réseau a une valeur de retard correspondante. Néanmoins, le terme est tou-

jours utilisé pour désigner les délais plus longs qui sont perceptibles par l'utilisateur. On parle aussi de latence pour le temps d'accès à une information sur une mémoire ou un système de stockage (disque ou bande magnétique). Le délai dépend de la façon dont l'ordonnancement est construit. Sachant que l'ordonnancement est généralement basé sur la quantité de données à transmettre et la qualité du lien.

- **Cycle de service** : Une exigence clé du système d'exploitation est de fournir des options d'économie d'énergie pour de nombreux petits appareils fonctionnant sur piles. L'une des options fournies est un mécanisme de cycle de service, dans lequel les nœuds alternent entre les périodes actives et de veille en fonction de l'activité du réseau. Le cycle de service est défini comme la portion de temps pendant laquelle le nœud est actif. Le moyen le plus efficace d'économiser de l'énergie est de mettre l'émetteur radio en mode veille lorsque la communication n'est pas requise. Le modèle de cycle d'utilisation est largement utilisé pour analyser les appareils IdO .

Tous les tests que nous avons effectués comparent notre proposition et les performances d'OS-CAR en termes de consommation d'énergie et de latence.

3.5.2 Environnement de simulation

Cooja (Contiki Os Java Simulation) est un simulateur implémenté en Java conçu pour simuler un réseau de capteurs exécutant le système d'exploitation Contiki. Il permet la simulation de plates-formes matérielles réelles (Skymote, Zlmote, MicaZ, etc.) ainsi que la simulation simultanée au niveau du réseau et du système d'exploitation. Cooja simule un réseau de nœuds de capteurs, où chaque nœud peut être d'un type différent. Non seulement c'est différent dans les logiciels embarqués, mais il peut également simuler des nœuds non Contiki, tels que des nœuds implémentés en Java, ou même des nœuds exécutant d'autres systèmes d'exploitation. Cela permet de simuler des réseaux hétérogènes. Dans un sens, de nombreuses parties du simulateur peuvent être facilement remplacées ou étendues avec des fonctions supplémentaires, ce qui est également très flexible. Des exemples de composants extensibles incluent le support radio analogique et le matériel de nœud analogique [66]. L'interface de simulation est illustrée à la figure 3.2 et se compose de cinq fenêtres : Network, Simulation control, Radio messages, Mote output, Buffer listener .

1. **Network** : Dans cette fenêtre s'affiche la représentation graphique du réseau.
2. **Simulation control** : C'est la fenêtre responsable du contrôle de la simulation (démarrage / mise en pause / arrêt).
3. **Radio messages** : Affiche les messages échangés dans le réseau.
4. **Mote output** : Affiche ce qui se passe à l'intérieur de chaque nœud.
5. **Buffer listener** : Affiche les données enregistrées dans chaque buffer.

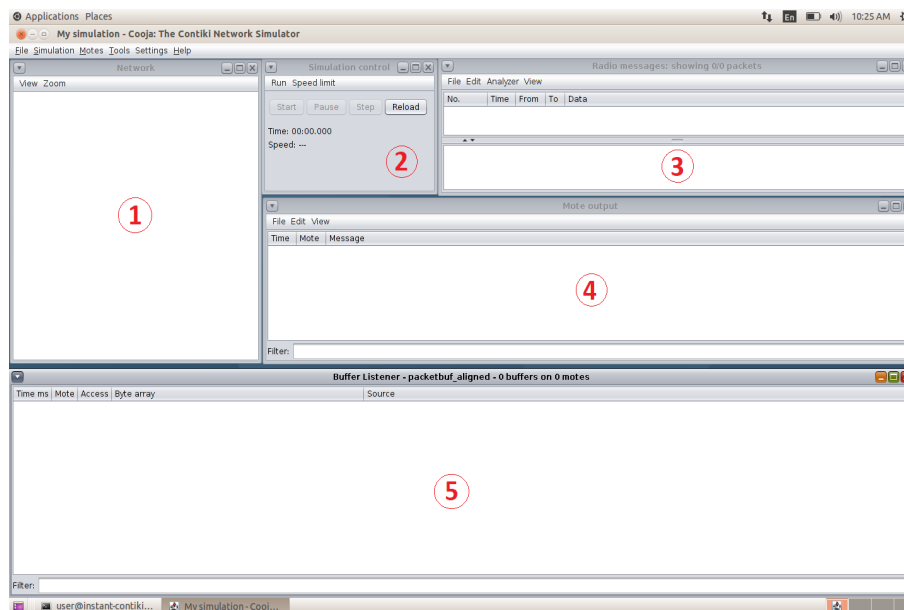


FIGURE 3.2 – Interface de COOJA

3.5.2.1 Scénario de simulation

Afin d'évaluer notre approche, nous effectuons une simulation sur CONTIKI en utilisant COOJA. Nous avons utilisé la plate-forme Zolertia Z1 comme nœud pour la simulation de réseau. Le module Energest peut être utilisé pour mettre en œuvre une approche logicielle légère d'estimation de l'énergie pour les appareils IdO à ressources limitées. En suivant l'heure à laquelle les différents composants matériels tels que la radio sont allumés, et en connaissant la consommation d'énergie du composant, il est possible d'estimer la consommation d'énergie. Dans COOJA, la latence est calculée comme une différence entre le moment du transmission du paquet vers le nœud cible et le moment à il a été reçu à la destination. Dans cette simulation la valeur de débit de données est égal à 1 paquet /minute.

Nous mesurons les performances de notre proposition en la comparant avec OSCAR et Orchestra. La slotframe est de taille 6 slots pour notre proposition et OSCAR, et 16 slots pour Orchestra. Cela signifie qu'une portion de 36 slots par slotframe est porté : la classe 0 bénéficiera de 6 slot, la classe 1 de 5 slot ainsi de suite. Enfin, la dernière classe aura qu'un seul slot tous les 36 slots. Sachant que le comportement du nœud varie en fonction de ca classe. Dans cette simulation nous avons choisi de varier la disposition du réseau. On a considéré un réseau de 60 nœuds. Deux topologies sont considérées :

Comme le montre le tableau 3.2 ci-dessus, les nœuds sont distribués sur différentes couches. La deuxième topologie est plus proche de la racine, par contre la première est un peu écartée et loin de la racine.

	Première topologie	Deuxième topologie
Nombre de nœuds en classe 0	5	14
Nombre de nœuds en classe 1	11	15
Nombre de nœuds en classe 2	11	15
Nombre de nœuds en classe 3	11	15
Nombre de nœuds en classe 4	11	0
Nombre de nœuds en classe 5	10	0

TABLEAU 3.2 – Le nombre des nœuds par classe

3.5.3 Évaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons notre proposition en la comparant à OSCAR et Orchestra en termes de deux mesures de performance citées précédemment dans la section 3.5.1.

3.5.3.1 Latence

La figure 3.3 montre la variation de la latence moyenne de bout en bout du réseau des algorithmes OSCAR, Orchestra et notre algorithme en fonction de la position des nœuds. Ce que l'on aperçoit, c'est que dans la 1ère topologie notre algorithme donne de meilleurs résultats par rapport à OSCAR et Orchestra. En effet, lorsqu'on sait que le nombre de slots alloués aux nœuds inactifs situés dans la classe 5 est égal à zéro, on obtient un résultat plus efficace en termes de latence. Concernant OSCAR et Orchestra, OSCAR offre de meilleurs résultats puisque le nombre des slots alloués aux nœuds proches de la racine est supérieur pour éliminer le trafic.

La deuxième topologie ne porte aucun changement en comparant avec à ceux de OSCAR, puisque dans la 2^{ème} disposition, la classe 5 n'inclut aucun nœud et notre algorithme a pris en considération que les nœuds inactifs qui se trouvent dans la dernière classe. Par conséquent, on a obtenu des résultats similaires OSCAR. En comparant OSCAR avec Orchestra, nous remarquons que la latence obtenue avec Orchestra est meilleure que celle obtenue avec OSCAR. Ceci est interprété par le fait de l'emplacement des nœuds qui sont proches à la racine. Les nœuds sont distribués entre les classes 0 et 3 par rapport à la 1^{er} topologie, ces nœuds ont plus d'opportunités de transmission.

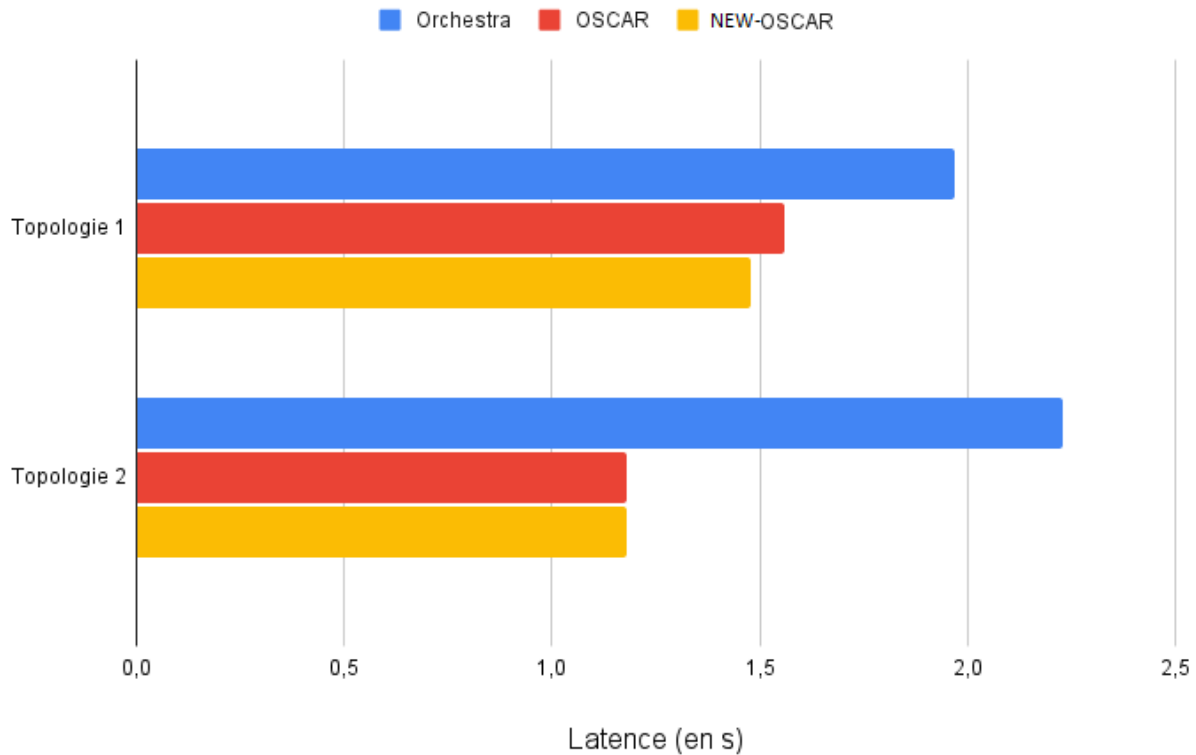


FIGURE 3.3 – Délai entre NEW-OSCAR, OSCAR et Orchestra en fonction de la position des nœuds

3.5.3.2 Cycle de service

La figure 3.4 représente les performances de cycle de service entre les trois algorithmes. Comme nous l'avons vu auparavant, le cycle de service désigne la période pendant laquelle le nœud est actif et sa radio est allumée. On observe pour la 1^{ère} topologie que le cycle de service moyen de notre proposition est inférieur à celui d'OSCAR et Orchestra. Certainement, des bénéfices d'énergie peuvent être constatés, et cela grâce au réajustement du cycle de service offert par l'algorithme proposé, car il permet de supprimer les slots alloués aux nœuds inactifs situés dans la classe 5.

Néanmoins, dans la 2^{ème} topologie, on observe que notre proposition n'apporte aucune amélioration en la comparant avec OSCAR, cela est justifié par l'absence de nœuds dans la classe 5. Concernant OSCAR et Orchestra, les résultats obtenus montrent une augmentation de cycle de service plus importante pour OSCAR. Cela peut être expliqué par la disposition des nœuds plus proches de la racine, donc les nœuds ont plus souvent leur radio allumée. Avec OSCAR, les nœuds possèdent un mécanisme dynamique d'allocation de cellules qui joue sur la position.

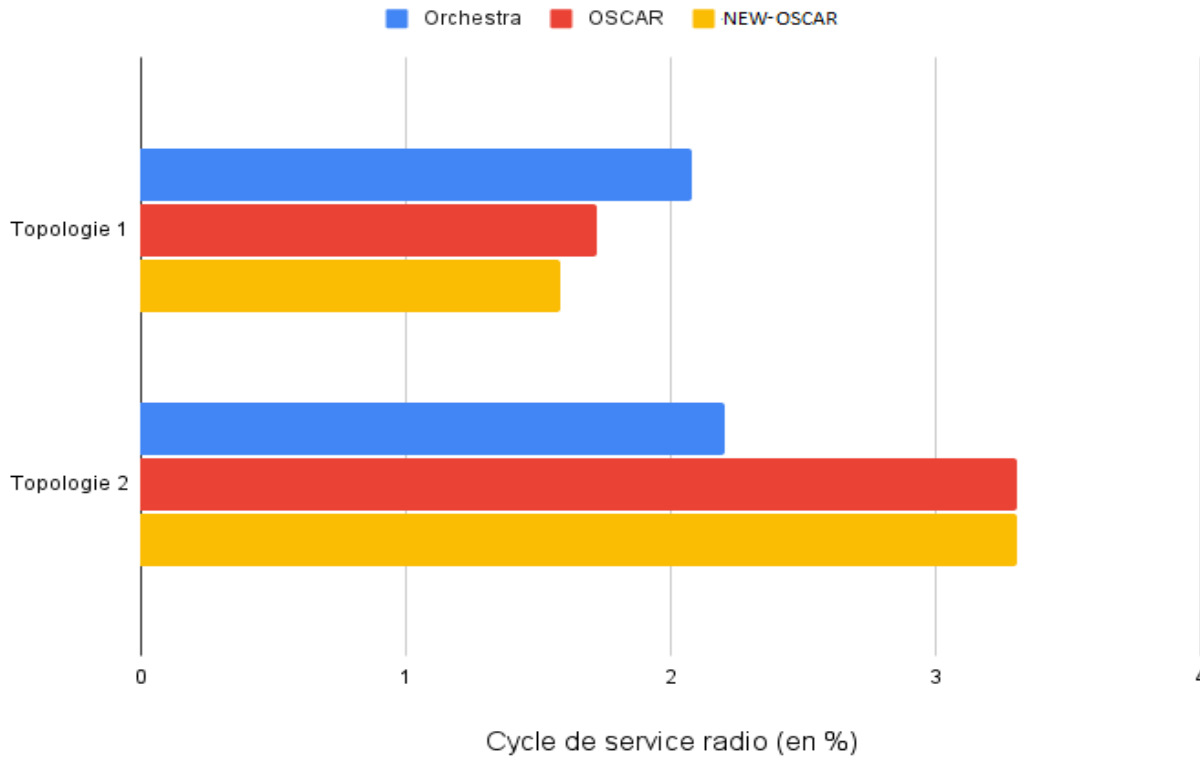


FIGURE 3.4 – Cycle de service entre NEW-OSCAR et OSCAR et Orchestra en fonction de la position des nœuds

3.5.3.3 Conclusion

A partir des résultats de simulation obtenus, nous déduisons que notre nouvelle version de OSCAR surpasse OSCAR en termes de latence et de consommation d'énergie, mais seulement pour certaines topologies plus écartées et loin de la racine (dans le cas de présence des nœuds dans la classe max). Notre proposition set à supprimer les slots réservés par les nœuds inactifs.

3.6 Conclusion et Perspectives

La technologie sans fil est très intéressante pour les applications industrielles car elle réduit considérablement les coûts d'installation très élevés. Les organisations industrielles telles que les raffineries de pétrole, les industries chimiques et les centrales électriques mettent en œuvre des processus de surveillance et de gestion complexes qui nécessitent des délais et une fiabilité très stricte. Une application courante des réseaux de capteurs sans fil dans ce domaine consiste à collecter des valeurs telles que la température, la pression, le débit de circulation ou le niveau de liquide du réservoir jusqu'aux nœuds de puits, qui sont tous deux utilisés pour contrôler les réservoirs, les environnements distants et la coordination des étapes de production. Par conséquent, afin de répondre

à la demande croissante de communication sans fil à faible puissance, à courte portée et robustes dans le domaine industriel, le groupe IEEE a publié l'amendement IEEE 802.15.4e en 2012, qui vise à améliorer et à étendre les fonctions de IEEE 802.15. (Accord 4-2011). Ces améliorations incluent plusieurs comportements MAC, en plus de fournir une communication déterministe, elles sont également conçues pour prendre en charge les mécanismes de saut de canal, comme dans le cas de DSME et TSCH. Il existe d'autres comportements MAC tels que LLDN, qui utilise le mécanisme TDMA pour fournir des garanties de temps.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement des mécanismes IEEE 802.15.4e TSCH. Nous nous sommes exactement intéresser à l'amélioration du mécanisme TSCH en se basant sur un ordonnancement autonome qui s'appel le OSCAR.

OSCAR gère le nombre de tranches de temps allouées à chaque nœud en utilisant la valeur de rang décrite par le protocole de routage RPL. Les nœuds sont répartis dans différentes couches et chaque nœud se voit attribuer un numéro de classe en fonction de sa proximité avec DODAG root. L'objectif est que plus un nœud est proche de la racine, plus il dispose d'intervalles de temps pour maximiser les opportunités de transmission. Afin d'éviter une consommation excessive, OSCAR a mis en place un mécanisme d'ajustement de la période de service radio de chaque nœud en réduisant les tranches de temps allouées aux nœuds inactifs, quelle que soit leur catégorie.

Notre proposition porte sur une amélioration de l'algorithme d'ajustement de cycle de service proposé par OSCAR. Elle s'adapte seulement aux situations les nœuds inactifs sont situés dans la classe max ; enfin elle supprime le nombre de slots alloués par ces nœuds.

L'analyse des performances montre des résultats variants entre notre proposition et l'algorithme OSCAR en termes de latence et de consommation d'énergie, et ceci selon la disposition des nœuds dans le réseau. Dans les deux agencements testés, la latence et le cycle de service radio obtenus avec notre algorithme sont inférieurs à ceux obtenus par les algorithmes OSCAR et Orchestra, et ceci lorsque la classe 5 inclut des nœuds inactifs, et restent similaire en cas d'absence des nœuds dans la classe 5.

Ce travail de recherche ouvre de nombreuses perspectives, visant notamment à développer des méthodes de résolution des défis, des application de collecte de données. Il sera intéressant d'explorer la combinaison de ce travail avec l'intelligence artificielle, où les nœuds peuvent s'adapter à la charge de trafic en temps réel en décidant d'allouer ou de supprimer dynamiquement des plages horaires de manière autonome. Cela améliorera l'efficacité en localisant les nœuds qui sont réellement affectés par la congestion ou l'inactivité, et réduira la latence et la consommation d'énergie.

Bibliographie

- [1] M. Osman and F. Nabki, “Oscar : An optimized scheduling cell allocation algorithm for convergecast in iee 802.15. 4e tsch networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 7, p. 2493, 2021.
- [2] M. Niranjan, N. Madhukar, A. Ashwini, J. Muddsar, and M. Saish, “Iot based industrial automation,” *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, pp. 36–40, 2017.
- [3] F. Geandarme, “Industrie 4.0 : definition et mise en œuvre vers l’usine connectée,” (Consulté le 20/08/2021).
- [4] Substance, “Arospatiale 4.0 : la 4e révolution industrielle en arospatiale!,” (Consulté le 20/08/2021).
- [5] S. Saadaoui, *Conception d’un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2019.
- [6] M. Collotta, G. Pau, T. Talty, and O. K. Tonguz, “Bluetooth 5 : A concrete step forward toward the iot,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131, 2018.
- [7] M. Andersson, “Use case possibilities with bluetooth low energy in iot applications,” *White Paper*, vol. 2, 2014.
- [8] JP.Hauet, “Aperu sur les nouvelles communications sans fil et leurs applications dans l’industrie,” 2004.
- [9] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE-the UMTS long term evolution : from theory to practice*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] E. M. Roche, W. Townes, *et al.*, “La prochaine génération de téléphonie mobile (5g) et ses implications (infrastructure, réglementation),” *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, no. 32-1/2, pp. 139–162, 2018.
- [11] Actualiteinformatique, “Qu’est-ce que l’iot (internet of things) ou internet des objets?.” <https://actualiteinformatique.fr/internet-of-things-iot/quest-ce-que-iot-internet-of-things-internet-des-objets>, (Consulté le 30/09/2021).
- [12] J. Teicher, “The little-known story of the first iot device.” <https://www.ibm.com/blogs/industries/little-known-story-first-iot-device/>, (Consulté le 30/09/2021).
- [13] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, “The internet of things : a survey,” *Information Systems Frontiers*, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, 2015.

- [14] A. Khanna and S. Kaur, "Evolution of internet of things (iot) and its significant impact in the field of precision agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 218–231, 2019.
- [15] P. Rioux, "Internet des objets : la societ toulousaine sigfox la conquete de l'es-pagne." <http://www.technomedia.org/2014/02/internet-des-objets-la-societe.html>, (Consulté le 30/09/2021).
- [16] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things : A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [17] F. Y.ait mouhoub, *Propotion d'un modèle de confiance pour l'internet des Objets*. PhD thesis, Université A/MIRA de Bejaia, 2015.
- [18] A. Calihman, "Architectures in the iot civilization." <https://www.netburner.com/learn/architectural-frameworks-in-the-iot-civilization/>, (Consulté le 28/10/2021).
- [19] J. A. Afonso, H. D. Silva, P. Macedo, and L. A. Rocha, "An enhanced reservation-based mac protocol for ieee 802.15. 4 networks," *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 3852–3873, 2011.
- [20] P. Pinault, "introduction aux objets connectés",
- [21] J. Pouabou, "Les topologies." <https://openclassrooms.com/fr/courses/1561696-les-reseaux-de-zero/3607161-les-topologies>, (Consulté le 28/10/2021).
- [22] Youcoin, "Comment fonctionne le (peer-to-peer)." <http://youcoin.ch/questions-reponses-faq/comment-fonctionne-le-peer-to-peer/>, (Consulté le 28/10/2021).
- [23] J.-P. H. et Franois Gerin, "Rapport principal internet des objets," 2018.
- [24] Postscapes, "Iot standards and protocols." <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>, (Consulté le 28/10/2021).
- [25] J. W. Hui and D. E. Culler, "Extending ip to low-power, wireless personal area networks," *IEEE Internet Computing*, vol. 12, no. 4, pp. 37–45, 2008.
- [26] T. Salman and R. Jain, "Networking protocols and standards for internet of things," *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, vol. 7, pp. 14–18, 2015.
- [27] X. Krasniqi and E. Hajrizi, "Use of iot technology to drive the automotive industry from connected to full autonomous vehicles," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 29, pp. 269–274, 2016.
- [28] C. Yang, W. Shen, and X. Wang, "Applications of internet of things in manufacturing," in *2016 IEEE 20th international conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD)*, pp. 670–675, IEEE, 2016.
- [29] F. Shrouf, J. Ordieres, and G. Miragliotta, "Smart factories in industry 4.0 : A review of the concept and of energy management approached in production based on the internet of things paradigm," in *2014 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management*, pp. 697–701, IEEE, 2014.

- [30] K. Wang, Y. Wang, Y. Sun, S. Guo, and J. Wu, "Green industrial internet of things architecture : An energy-efficient perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 48–54, 2016.
- [31] X. Xu, T. Chen, and M. Minami, "Intelligent fault prediction system based on internet of things," *computers & Mathematics with Applications*, vol. 64, no. 5, pp. 833–839, 2012.
- [32] J. Wan, S. Tang, D. Li, S. Wang, C. Liu, H. Abbas, and A. V. Vasilakos, "A manufacturing big data solution for active preventive maintenance," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 2039–2047, 2017.
- [33] J. Lee, H. D. Ardakani, S. Yang, and B. Bagheri, "Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation," *Procedia cirp*, vol. 38, pp. 3–7, 2015.
- [34] N. Jazdi, "Cyber physical systems in the context of industry 4.0," in *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics*, pp. 1–4, IEEE, 2014.
- [35] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. Jasperneite, "The future of industrial communication : Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.
- [36] M. Badet and W. Bonneau, "Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation," *mémoire de Master*, 2006.
- [37] D. Rey, *Collecte des données d'un réseau de capteurs sans fils en utilisant une surcouche réseau pair à pair*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [38] M. Osman Abdi, *Optimisation de la performance d'un réseau de capteurs sans fil pour les applications de collection de données à faible énergie et courte latence*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2020.
- [39] Y. DERDOUR, *Conception et Développement d'un Système d'exploitation basé sur les Réseaux de Capteurs sans fil*. PhD thesis, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella.
- [40] Z. Tang, H. Wang, Q. Hu, and L. Hai, "How network coding benefits converge-cast in wireless sensor networks," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 7, pp. 1180–1197, 2013.
- [41] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2003.
- [42] "Ieee standard for telecommunications and information exchange between systems - lan/man specific requirements - part 15 : Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (wpan)," *IEEE Std 802.15.4-2003*, pp. 1–680, 2003.
- [43] ZigBee-Alliance, "Zigbee specification." <https://zigbeealliance.org>, (Consulté le 30/09/2021).

- [44] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. W. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, J.-P. Vasseur, R. K. Alexander, *et al.*, “Rpl : Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks.” *rfc*, vol. 6550, pp. 1–157, 2012.
- [45] “Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.4 : Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (wpans),” *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pp. 1–320, 2006.
- [46] S. Touloum, *Modelisation et Optimisation dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil*. PhD thesis, Université Abderahmane MIRA de Bejaia, 2020.
- [47] C. OUANTEUR, *Evaluation de performances des Réseaux de capteurs sans fil IEEE 802.15.4*. PhD thesis, Université Abderahmane MIRA de Bejaia.
- [48] ieee, “Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.4 : Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans) : Amendment 1 : Add alternate phys,” *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–210, 2007.
- [49] “Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.4 : Amendment 2 : Alternative physical layer extension to support one or more of the chinese 314-316 mhz, 430-434 mhz, and 779-787 mhz bands,” *IEEE Std 802.15.4c-2009 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–30, 2009.
- [50] “Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.4 : Amendment 3 : Alternative physical layer extension to support the japanese 950 mhz bands,” *IEEE Std 802.15.4d-2009 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–40, 2009.
- [51] “Ieee standard for local and metropolitan area networks–part 15.4 : Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans) amendment 1 : Mac sublayer,” *IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, pp. 1–225, 2012.
- [52] H. Kurunathan, R. Severino, A. Koubaa, and E. Tovar, “Ieee 802.15. 4e in a nutshell : Survey and performance evaluation,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1989–2010, 2018.
- [53] T. Hamza, *Conception et analyse des méthodes d’ordonnancement dans les réseaux 6TiSCH-802.15. 4e à mode TSCH pour les applications industrielles de l’Internet des Objets*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2019.
- [54] S. Touloum, L. Bouallouche-Medjkoune, D. Aissani, and C. Ouanteur, “Performance analysis of the ieee 802.15. 4e tsch-ca algorithm under a non-ideal channel,” 2020.
- [55] D. De Guglielmo, B. Al Nahas, S. Duquennoy, T. Voigt, and G. Anastasi, “Analysis and experimental evaluation of ieee 802.15. 4e tsch csma-ca algorithm,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 2, pp. 1573–1588, 2016.

- [56] P. O. Kamgueu, E. Nataf, and T. D. Ndie, “Survey on rpl enhancements : a focus on topology, security and mobility,” *Computer Communications*, vol. 120, pp. 10–21, 2018.
- [57] 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. 327–332, IEEE, 2012.
- [58] 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. 91–100, IEEE, 2012.
- [59] K.-H. Choi and S.-H. Chung, “A new centralized link scheduling for 6tisch wireless industrial networks,” in *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, pp. 360–371, Springer, 2016.
- [60] N. Accettura, E. Vogli, M. R. Palattella, L. A. Grieco, G. Boggia, and M. Dohler, “Decentralized traffic aware scheduling in 6tisch networks : Design and experimental evaluation,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2, no. 6, pp. 455–470, 2015.
- [61] R. Soua, P. Minet, and E. Livolant, “Wave : a distributed scheduling algorithm for convergecast in ieee 802.15. 4e tsch networks,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 4, pp. 557–575, 2016.
- [62] A. K. Demir and S. Bilgili, “Diva : a distributed divergecast scheduling algorithm for ieee 802.15. 4e tsch networks,” *Wireless Networks*, vol. 25, no. 2, pp. 625–635, 2019.
- [63] A. Aijaz and U. Raza, “Deamon : A decentralized adaptive multi-hop scheduling protocol for 6tisch wireless networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 20, pp. 6825–6836, 2017.
- [64] S. Duquennoy, B. Al Nahas, O. Landsiedel, and T. Watteyne, “Orchestra : Robust mesh networks through autonomously scheduled tsch,” in *Proceedings of the 13th ACM conference on embedded networked sensor systems*, pp. 337–350, 2015.
- [65] S. Kim, H.-S. Kim, and C. Kim, “Alice : Autonomous link-based cell scheduling for tsch,” in *Proceedings of the 18th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 121–132, 2019.
- [66] F. Osterlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt, “Cross-level sensor network simulation with cooja,” in *Proceedings. 2006 31st IEEE conference on local computer networks*, pp. 641–648, IEEE, 2006.

RÉSUMÉ

La norme IEEE 802.15.4e est considérée comme un outil clé pour l'Internet des objets (IdO), elle est un pilier majeur de l'IdO Industriel (IIo), grâce à son mode Time Slotted Channel Hopping (TSCH). TSCH permet aux nœuds, dans un réseau IIo, de sauter entre les 16 canaux de la norme IEEE 802.15.4 dans des slots de temps spécifiés afin de répondre aux exigences de fiabilité et en temps réel des applications industrielles, tout en économisant l'énergie des nœuds. Dans TSCH, le temps est divisé en slot de temps et un calendrier détermine l'action qu'un nœud doit entreprendre dans chaque slot de temps (émission, réception ou mise en veille). Dans le cas du trafic convergent, les nœuds loin de la racine ne présente pas un trafic important. Dans ce contexte, les algorithmes d'allocation de cellules qui sont responsables du comportement de chaque nœud à chaque intervalle de temps, doivent encore évaluer pour prendre en charge le trafic convergent et fournir des solutions. Dans ce mémoire, nous proposons un algorithme de réajustement de cycle de service radio de chaque nœud. C'est un ordonnancement autonome basé sur OSCAR. Cette nouvelle conception diffère d'OSCAR par le fait que notre algorithme n'attribue pas des slots aux nœuds inactifs situés dans la dernière classe, pour éviter la surconsommation d'énergie. Afin d'évaluer les performances de notre proposition, nous implémentons l'algorithme d'OSCAR sur Contiki OS, ainsi que notre amélioration apportée à cet algorithme. Les résultats obtenus à partir de la simulation réalisée sous Cooja montre que, notre algorithme surpasse OSCAR en termes de latence et d'énergie, lorsque la topologie de réseau est plus écartée et loin de la racine.

Mots : l'IdO, TSCH, Ordonnancement autonome, Réseaux convergent, IEEE 802.15.4e, Latence, Surconsommation d'énergie.

ABSTRACT

The IEEE 802.15.4e standard is considered a key tool for the Internet of Things (IoT), it is a major pillar of the industrial IoT (IIoT), thanks to its Time Slotted Channel Hopping (TSCH) mode. TSCH allows nodes, in an IoT network, to jump between the 16 channels of the IEEE 802.15.4 standard into specified time slots to meet the reliability and real-time requirements of industrial applications, while saving node energy. In TSCH, time is divided into time slots and a calendar determines the action a node must take in each time slot (transmit, receive or sleep). In the case of converging traffic, nodes away from the root don't present significant traffic. In this context, cell allocation algorithms that are responsible for the behavior of each node at each time interval, still need to evaluate to support convergent traffic and provide solutions. In this memory, we propose an algorithm for readjusting the radio service cycle of each node. It is an autonomous scheduling TSCH based on OSCAR. This new design differs from OSCAR in that our algorithm does not assign slots to inactive nodes located in the last class, to avoid over-consumption of energy. In order to evaluate the performance of our proposal, we implement the OSCAR algorithm on Contiki OS, as well as our improvement of this algorithm. The results obtained from the simulation performed under Cooja show that, our algorithm surpasses Oscar in terms of latency and energy, when network topology and further spread and away from the root.

Key words : IIoT, TSCH, autonomous scheduling, Converging traffic, IEEE 802.15.4e, Over-consumption of energy, Latency