



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master

Mention : Informatique

Spécialité : Génie logiciel

Sujet : Modèle de déploiement optimal des nœuds pour un réseau LoRa multilinéaire de bout en bout sans fil

Présenté et soutenu publiquement par **M. Ass DIANE**

Le samedi 26 mars 2022

Sous la direction de :

Dr El hadji Malick NDOYE et Dr Ousmane DIALLO

Devant le jury composé de :

M. Youssou FAYE	Maître de conférence UASZ	Président
M. Mouhamadou GAYE	Enseignant – Chercheur UASZ	Examineur
Mme Marius DASYLVA	Enseignante – Chercheuse UASZ	Rapporteuse
M. El Hadji Malick NDOYE	Enseignant – Chercheur UASZ	Encadrant
M. Ousmane DIALLO	Maître de conférence UASZ	Co-Encadrant

Résumé

Inventé en 1999 par Kevin AHSTON, l'internet des objets (IDO) est devenu aujourd'hui un domaine en pleine expansion. Cela est notamment dû à l'avancée des technologies numériques, à la miniaturisation, à la réduction du coût des dispositifs IDO et à la connectivité sans fil, entre autres. Malgré la pléthore de technologies utilisées pour l'Internet des objets, le compromis entre une longue portée de transmission et une faible consommation d'énergie n'a pas été trouvé avant l'avènement des technologies LPWAN. L'une de ces technologies, LoRa, est le réseau idéal pour la surveillance des pipelines, des infrastructures ferroviaires, des routes, des frontières, etc. qui ont une topologie linéaire. Comme l'environnement de déploiement du réseau s'étend sur des dizaines de kilomètres, il est alors essentiel d'optimiser le déploiement.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une architecture de réseau sans fil de bout en bout basée sur des liens LoRa. Des simulations de performances basées sur le simulateur omnet++ permettent de définir un schéma de déploiement optimal réutilisable à grande échelle.

Les résultats montrent que sur une distance de dix kilomètres, le déploiement uniforme de quatre passerelles dans le réseau permet d'obtenir une bonne efficacité et d'assurer la fiabilité du réseau.

Mots-clés : LoRa, Internet des objets, réseau linéaire, motif de déploiement, optimisation, LPWAN

Abstract

Invented in 1999 by Kevin AHSTON, the Internet of Things (IoT) has nowadays become an ever-growing field. This is particularly due to advance in the digital technologies, the miniaturization, the reducing cost of IoT devices and wireless connectivity, among others. Despite the plethora of technologies in use for the Internet of Things, the trade-off between long transmission range and low energy consumption was not found until the advent of LPWAN technologies. One of these technologies, LoRa, is the ideal network for monitoring pipelines, railway infrastructures, roads, borders, ... which have linear topology. Since the network deployment environment extends over tens of kilometers, then it is essential to optimize the deployment.

The objective of this master's thesis is to propose an end-to-end wireless network architecture based on LoRa links. Performance simulations based on omnet++ simulator make it possible to define an optimal deployment pattern reused for large-scale.

Results show that over a distance of ten kilometers, the uniform deployment of four gateways in the network achieves good efficiency and ensures network reliability

Keywords: LoRa, Internet of Things, linear network, deployment pattern, optimization, LPWAN

DEDICACES ET HOMMAGES

*Ce mémoire est dédié à deux personnes qui me sont chères et qui, malheureusement, ne sont plus dans ce bas monde. Je fais référence à ma grand-mère, **ADJIA OULIMATA NDAO**, une bonne éducatrice et mon père **GOUMBA DIANE**, un vaillant papa.*

Que leurs âmes reposent en paix !

REMERCIEMENTS

Écrire un mémoire n'est jamais une promenade de santé. Mais avec le soutien de tous ceux que je citerais ici, nous y sommes parvenus.

Je commence par adresser mes sincères remerciements à mes encadrants, Dr El hadji Malick NDOYE et Dr Ousmane DIALLO, tous les deux enseignants au sein du département informatique de l'université Assane SECK de Ziguinchor pour l'encadrement de qualité dont j'ai bénéficié. Ils n'ont ménagé aucun effort pour l'aboutissement de ce projet de recherche. Des encadrants très disponibles et toujours prêts à répondre à mes sollicitations.

Je suis très reconnaissant envers les membres du jury, composé de :

- **M. Youssou FAYE** Maître de conférence UASZ Président
- **M. Mouhamadou GAYE** Enseignant chercheur UASZ Examineur
- **Mme Marius DASYLVA** Enseignante – Chercheuse UASZ Rapporteuse
- **M. El hadji Malick NDOYE** Enseignant – Chercheur UASZ Encadrant
- **M. Ousmane DIALLO** Maître de conférence UASZ Co-encadrant

, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude à tous les enseignants du département informatique pour la formation de qualité qu'ils nous ont offert.

Je tiens à remercier chaleureusement et de toutes mes forces ma famille et notamment mon tuteur à Ziguinchor Babacar DIAGNE. J'ai la chance d'appartenir à une famille qui me témoigne son soutien indéfectible sur tous les plans et à toutes épreuves.

Je termine par dire un grand merci à mes amis ainsi que mes camarades de classe pour les bons moments constructifs que j'ai eu à partager avec eux.

Merci à tous ceux qui ont participé à ma formation.

Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
DEDICACES ET HOMMAGES	iii
REMERCIEMENTS	iv
Sommaire	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : INTERNET DES OBJETS (IDO).....	3
I. Introduction	3
II. Concepts et Définition	4
1) Concepts.....	4
2) Définition	5
III. Architecture de l’Internet Des Objets	6
IV. Reseaux et protocoles de communication dans l’IDO.....	8
1) Les réseaux courte portée.....	9
2) Les réseaux longue portée.....	13
V. Impact des objets connectés	14
1) La santé	14

2) Villes intelligentes et domotique	14
3) Agriculture et Elevage	15
4) Industrie	16
VI. Les defis de recherches.....	16
VII. La normalisation dans l'IDO	17
VIII. Conclusion	18
Chapitre II : LES TECHNOLOGIES LPWAN.....	19
I. Introduction	19
II. Caractéristiques des LPWAN.....	19
1) Longue portée	20
2) Faible consommation	21
3) Faible coût.....	22
4) Evolutivité.....	22
III. Technologies existantes	22
1) LoRa.....	24
2) SigFox	24
3) NB-IoT	25
IV. Comparaison entre les technologies	26
1) Qualité de services (QoS)	27
2) Consommation énergétique	27
3) Portée de la transmission, Couverture réseau	28
4) Coût.....	28
V. Conclusion	29

Chapitre III : RESEAU LoRa.....	30
I. Introduction	30
II. Architecture d'un réseau LoRa.....	30
III. LoRa vs LoRaWAN	31
1) La couche physique LoRa.....	32
2) Le protocole LoRaWAN.....	34
IV. La communication dans LoRaWAN	37
V. L'algorithme ADR.....	38
VI. Réseaux LoRa linéaires	39
1) Généralités sur les déploiements des réseaux linéaires.....	40
2) Travaux sur les réseaux LoRa linéaires	41
VII. Problématique.....	42
VIII. Etat de l'art des simulateurs LoRa	42
1) Les simulateurs d'un réseau LoRa	43
2) Comparaison des simulateurs LoRa.....	46
IX. Conclusion.....	47
Chapitre IV : Proposition d'une architecture LoRa sans fil linéaire	48
I. Introduction	48
II. Hypothèses et architecture proposée	48
1) Hypothèses.....	48
2) Topologie physique.....	50
3) Topologie logique	50
III. Implémentation de l'architecture sans fil de Bout en bout.....	51

IV.	Configurations de simulation.....	52
V.	Analyses et discussion des résultats	55
VI.	Synthèses	60
VII.	Conclusion	61
CONCLUSIONS ET PRESPECTIVES.....		62
Annexe : OMNet++ et INET.....		63
I.	Présentation et installation de OMNeT ++.....	63
1)	Présentation.....	63
2)	Installation.....	66
Présentation de INET[48].....		67
Bibliographie.....		69

Liste des figures

Figure 1 : Un Internet des objets (IDO) : nombre d'appareils connectés dans le monde de 2015 à 2025(en milliards)	4
Figure 2 : capteur-de-temperature-et-humidite-arduino-raspberry-dht11-integre	4
Figure 3 : Architecture à 3 niveaux pour l'IDO	7
Figure 4 : Le positionnement des LPWAN par rapport à d'autres technologies sans fil[20] ..	20
Figure 5 : Topologie en étoile	21
Figure 6: Architecture Sigfox[23]	25
Figure 7 : Architecture de réseau NB-IoT[24]	26
Figure 8 : Avantages respectifs de Sigfox, LoRa et NB-IoT[20].....	27
Figure 9 : Architecture classique LoRaWAN	31
Figure 10: A linear frequency modulated upchirp in the time domain[28]	32
Figure 11 : LoRa frame structure[33]	34
Figure 12 : LoRaWAN Classes[34]	35
Figure 13 : : End-device receive-slot timing[34]	36
Figure 14 : Class B reception window and beacon timing[33]	36
Figure 15 : Class C end-device reception slot timing[34].....	37
Figure 16 : Déploiement linéaire à un niveau	40
Figure 17 : Déploiement à deux niveaux	41
Figure 18 : Exemple d'une topologie réseau dans FLoRa	43
Figure 19 : Exemple de graphique avec PhySimulator[41]	45
Figure 20 : Exemple de graphique avec LoRaSim.....	46
Figure 21 : Architecture réseau proposée.....	49

Figure 22 : Implémentation d'un nœud LoRa dans FLoRa	52
Figure 23 : Implémentation d'une passerelle LoRa dans FLoRa	52
Figure 24 : Placement uniforme des passerelles dans le réseau	53
Figure 25 : Topologie physique du réseau simulé.....	55
Figure 26 : Le SNIR moyenne pour les passerelles du réseau	56
Figure 27 : Le DER selon le nombre de passerelle en fonction de la distance entre les nœuds terminaux.....	58
Figure 28 : Le débit de paquet en fonction du nombre de passerelle dans le réseau	59
Figure 29 : Le NEC selon le nombre de passerelle en fonction de la distance entre les nœuds terminaux.....	60
Figure 30 : Modèle d'un réseau dans OMNeT++	64
Figure 31 : Exemple de fichier NED.....	65
Figure 32 : Exemple de fichier NED.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classement des technologies utilisées dans l'DO.....	8
Tableau 2 : Les différentes couches et leurs descriptions du protocole Z-Wave.....	10
Tableau 3 : Spécifications techniques ZigBee[10].....	11
Tableau 4 : caractéristiques des technologies LPWAN : Sigfox, LoRa et NB-IoT.	23
Tableau 5 : Coût des composants dans SigFox, LoRaWAN et NB-IoT[22]	28
Tableau 6 : LoRa Spreading Factors[30]	33
Tableau 7 : Comparaison des simulateurs LoRa[41]	47
Tableau 8: Principaux paramètres de simulation	54

Liste des abréviations

3GPP	3rd Génération Partnership Project
ADR	Adaptative Data Rade
BLE	Bluetooth Low Energy
BW	Bandwith
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CERP-IDO	Cluster Des Projets Europeens De Recherche Sur L'internet Des Objets
CR	Code Rade
CSS	Chirp Spread Spectrum
D-BPSK	Differentials Binary Phase-Shift Keying
DER	Data Extraction Rate
FLoRa	Framework For LoRa
GSM	Global System For Mobile Communication
IDO	Internet Des Objets
IEEE	Institut Des Ingénieurs Electriciens Et Electroniciens
IIOT	Internet des Objets Industriel

IP	Internet Protocol
ISM	Industrielle, Scientifique Et Médicale
ISO	Organisation Internationale De Normalisation
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE-M	Long-Term Evolution For Machines
MAC	Medium Access Control
MME	Mobility Management Entity
NB-IOT	Narrowband Internet Of Things
NEC	Network Energy Consumption
NED	Network Description
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
OSI	Open Systems Interconnection
OTAA	Over-the-Air Activation
QoS	Quality Of Services

QPSK	Quadrature phase-shift keying
RFID	Radio-Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNIR	Signal-To-Noise-Plus-Interférence Ratio
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UNB	Ultra Narrow Band

INTRODUCTION GENERALE

L'Internet des objets (IDO) est un concept qui gagne du terrain de jour en jour grâce aux progrès significatifs de l'informatique, des télécommunications et de la miniaturisation électronique. Il se caractérise par l'interconnexion entre les objets et l'échange de données. L'Internet des objets contribue au développement de plusieurs domaines dont la santé avec la connexion des équipements médicaux et l'accès facile aux dossiers médicaux des patients, les villes intelligentes avec l'éclairage public intelligent et un environnement intelligent, l'agriculture et l'élevage avec le système d'irrigation intelligent et le " collier connecté ", l'industrie avec la maintenance prédictive. Certaines applications de l'Internet des objets nécessitent une transmission à longue portée et une faible consommation d'énergie des nœuds du réseau. C'est dans ce contexte que les technologies de réseaux étendus à faible consommation (Low Power Wide Area Network, LPWAN), telles que LoRa (Long Range), ont émergé. Les caractéristiques de la technologie LoRa nous permettent d'envisager le déploiement de réseaux LoRa pour la surveillance des frontières, des gazoducs, des oléoducs, des aqueducs, des routes, etc. Dans ce cas, un placement sous une forme linéaire des nœuds du réseau est privilégié en raison de la topologie linéaire de l'environnement à surveiller. Nous entrons ainsi dans le périmètre des réseaux LoRa linéaires.

Bien que la technologie LoRa ait une portée de transmission pouvant atteindre des kilomètres et une robustesse accrue contre les interférences, il est nécessaire de se concentrer sur l'optimisation du réseau afin d'avoir une bonne couverture de l'environnement à surveiller tout en minimisant la consommation d'énergie dans le réseau et avec un faible coût. L'architecture classique des réseaux LoRa, composée de liaison filaire et sans fil, peut ne pas être adaptée au réseau LoRa linéaire du fait des caractéristiques spécifiques à ce tel réseau. Dans cette optique, ce travail de recherche propose une architecture d'un réseau LoRa de bout en bout sans fil, différente de l'architecture traditionnelle. Il s'agit par la suite, d'optimiser le déploiement des nœuds dans le réseau en fonction de critères de performance tels que le taux de réception des paquets, le débit de paquets, la consommation en énergie et le SNIR (Signal-To-Noise-Plus-

Interférence Ratio). L'implémentation est réalisée à l'aide de FLoRa basé sur le simulateur réseaux OMNeT++.

Ce mémoire est organisé en quatre (04) chapitres.

Le **chapitre 1** est une étude panoramique de l'internet des objets. Il aborde les concepts au tour des objets connectés, les domaines impactés par l'IDO, les différentes technologies employées dans le cadre de l'IDO, la normalisation et les défis de recherche dans ce domaine.

Le **chapitre 2** est consacré aux réseaux LPWAN à travers les trois technologies leaders de cette famille à savoir LoRa, Sigfox et NB-IoT. Les caractéristiques des réseaux LPWAN ainsi qu'une étude comparative de ces technologies sont développés dans ce chapitre.

Une étude approfondie de la technologie LoRa est présentée dans le **chapitre 3**. Cette réflexion fait focus sur la couche physique LoRa, la couche MAC LoRaWAN, les réseaux LoRa linéaires et l'algorithme ADR (adaptative data rate). Un état de l'art et une comparaison des simulateurs de réseaux LoRa sont présentés dans ce chapitre.

Dans le **chapitre 4**, nous proposons une architecture de LoRa multilinéaire sans fil et un motif de déploiement linéaire sur 10 km des nœuds LoRa avec une optimisation du nombre de passerelles à déployer.

Chapitre I : INTERNET DES OBJETS (IDO)

I. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous faisons une étude panoramique de l'internet des objets ou Internet of thing(IOT) en anglais. Ce concept gagne du terrain de jour en jour dans le monde grâce au progrès notable de l'informatique, de la télécommunication, de la miniaturisation électronique etc. Le développement des objets connectés et communicants ne cesse de progresser et de plus en plus d'objet sont disponibles sur le marché comme l'atteste cette statistique qui prévoit 75,44 milliards d'appareils connectés dans le monde en 2025[1](voir [Figure 1](#)). Incontestablement, l'adoption de l'internet des objets par le grand public changera la vie quotidienne des populations. La manière dont nous interagissons avec les objets passera du contact physique au numérique. L'internet des objets est un domaine pluridisciplinaire et est en vogue dans le milieu de la recherche scientifique.

Dans ce chapitre, nous verrons le l'écosystème de l'internet des objets en abordant les réseaux des objets connectés, les secteurs impactés, les défis de recherches et les organismes de normalisation.

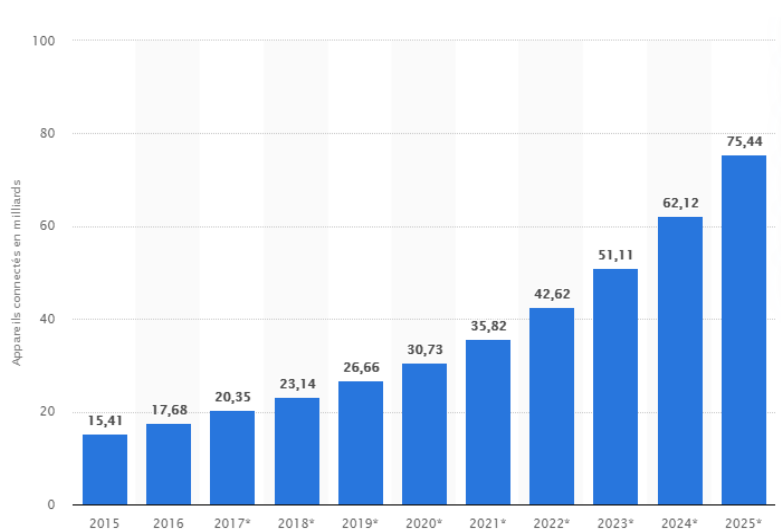


Figure 1 : Un Internet des objets (IDO) : nombre d'appareils connectés dans le monde de 2015 à 2025(en milliards)

II. Concepts et Définition

1) Concepts

Pour démystifier l'IDO, il est clair qu'il faut au préalable s'intéresser à quelques concepts clés de l'écosystème IDO. Les capteurs et les actionneurs constituent le levier sur lequel repose la majeure partie des services rendus grâce à l'internet des objets. Alors nous allons scruter de plus près ces deux concepts :

- Les **capteurs** (exemple de capteur voir Figure 2) sont des dispositifs permettant d'acquérir une grandeur physique comme la température, l'accéléromètre, l'humidité, ... et les transforment en une information numérique. Dans l'internet des objets la connaissance du contexte de l'objet est essentielle et elle est rendue possible grâce aux capteurs[2]. Ils sont les principaux éléments permettant de collecter des données sur l'environnement de l'objet et/ou sur l'objet en tant que tel. Les capteurs sont très souvent mis en réseau pour former un réseau de capteurs sans fil (Wireless sensor network WSN en anglais).

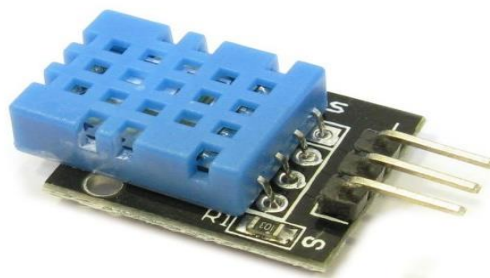


Figure 2 : capteur-de-temperature-et-humidite-arduino-raspberry-dht11-integre

- Les **actionneurs**, complémentaires aux capteurs, permettent d’agir sur l’objet ou de changer son état ou son environnement. Comme nous l’avons expliqué ci-dessus, les capteurs informent sur le contexte de l’objet et les actionneurs agissent en fonction de celui-ci(contexte). Il peut s’agir d’interrupteur, d’alarme, une photo prise par un drone après que ces capteurs détectent une situation, l’activation d’un thermostat pour chauffer une pièce de la maison etc.

2) Définition

Il n’existe pas de définition standard pour l’internet des objets, elle varie d’un acteur à l’autre. Pour bien expliquer l’internet des objets, il est plus que nécessaire de s’intéresser au concept qui le forme. Internet est un réseau informatique mondial constitué d’un ensemble de réseaux nationaux, régionaux et privés. L’ensemble utilise un même protocole de communication : TCP/IP, (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)[3]. Les trois principaux services à savoir le web, le courrier électronique et l’échange de fichier qu’offrent l’internet sont ancrés dans nos vies quotidiennes. A ses débuts l’internet n’était pas accessible à tous le monde mais avec le travail acharné des chercheurs, des ingénieurs, des techniciens ... dans les domaines de l’informatique, de la télécommunication, de l’électronique ... , nous avons assisté à une vulgarisation ou une utilisation généralisée de l’internet par toutes les couches de la société.

L’autre concept principal et fondamental de l’écosystème de l’internet des objets est les objets connectés. La fonction première de tout objet n’est pas d’être connecté à Internet. Par exemple l’objectif d’une lampe est d’éclairer mais la connecter à Internet ajoute de la valeur à la lampe. Un objet connecté possède les caractéristiques[4] suivantes :

- Avoir un mode de réalisation physique et un ensemble de caractéristiques physiques (p. ex. taille, forme, etc.)
- Avoir un ensemble minimal de fonctionnalités de communication, comme la capacité à être découvert et à accepter les messages entrants et y répondre
- Posséder un identifiant unique

- Sont associés à au moins un nom et une adresse. Le nom est une description lisible par l'homme de l'objet et peut être utilisé à des fins de raisonnement. L'adresse est une chaîne lisible par machine qui peut être utilisée pour communiquer à l'objet.
- Posséder des capacités informatiques de base. Cela va de la possibilité de faire correspondre un message entrant à une empreinte donnée (comme dans les RFID passives) à la capacité d'effectuer des calculs assez complexes, y compris tâches de découverte de service et de gestion de réseau.
- Peut posséder des moyens de détecter des phénomènes physiques (par exemple, température, lumière, niveau de rayonnement électromagnétique) ou pour déclencher des actions ayant un effet sur la réalité physique (actionneurs).

Parmi les multiples définitions de l'internet des objets, nous retenons celle du CERP-IDO (Cluster des projets européens de recherche sur l'internet des objets) qui le définit comme : <<Une infrastructure dynamique d'un réseau global. Ce réseau global a des capacités d'auto-configuration basée sur des standards et des protocoles de communication interopérables. Dans ce réseau, les objets physiques et virtuels ont des identités, des attributs physiques, des personnalités virtuelles et des interfaces intelligentes, et ils sont intégrés au réseau d'une façon transparente.>>[5]

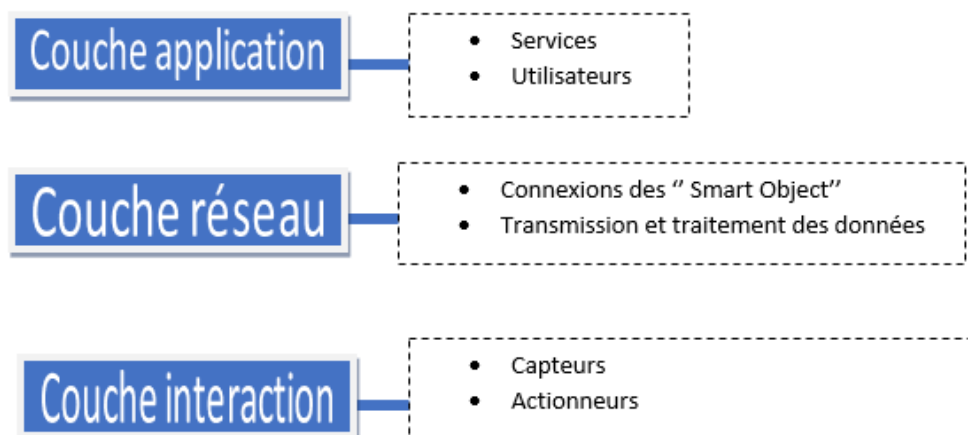
III. Architecture de l'Internet Des Objets

L'internet des objets est un concept basé sur des transferts de données, collectées par des objets, à travers l'internet. Donc il n'est pas nécessaire de repenser une infrastructure différente de celle de l'internet actuel. "L'infrastructure de l'internet ne vas pas disparaître. Au contraire il conservera son rôle vital comme colonne vertébral mondial pour le partage la diffusion des informations, l'interconnexion des objets physiques avec la capacité informatique/communication sur un large éventail de services et technologies"[4] . La problématique sur laquelle devons nous pencher est la suivante : les protocoles utilisés dans l'internet suffiront-ils pour connecter les objets à internet ? La réponse à cette question est

relativement négative car certains protocoles (http, https) étaient développés sans tenir compte des contraintes liées à la capacité de traitement, mémoire, débit de communication[6].

Il n'existe pas de consensus sur l'architecture de l'internet des objets qui est universel mais une architecture à trois couche(voir [Figure 3](#)), composée de la couche interaction, la couche réseau et la couche application, donne une représentation globale du concept l'internet des objets.

- **La couche interaction** : C'est la couche qui regroupe les objets. Elle permet de collecter les informations sur l'environnement grâce aux capteurs intégrés dans l'objets ou d'agir sur l'environnement par le biais des actionneurs. Les éléments centraux de cette couche sont les capteurs et les actionneurs.
- **La couche réseau** : Cette couche est responsable de l'acheminement des données issues des objets vers l'internet et vice versa. Donc elle permet l'interconnexion entre les objets et entre les objets et l'internet.
- **La couche application** : Elle permet de se rendre compte de l'utilité des objets connectés et de valoriser les données issues des objets. La couche application est responsable des services délivrés à l'utilisateur.



[Figure 3](#) : Architecture à 3 niveaux pour l'IDO

IV. Réseaux et protocoles de communication dans l'IDO

Les protocoles et réseaux dans IDO sont variés et divers. Il est aberrant d'aborder les protocoles en faisant abstraction du protocole IP (Internet Protocol) v4 ou v6. Peu importe le réseau et les protocoles utilisés pour interconnecter les objets, l'IP est incontournable. A-t-on besoin de connecter tous les équipements de réseaux en mode IP ? En effet une trame IP comporte au minimum 20 octet d'entête en IPv4 et 40 octets en IPv6 [6]. En sachant que pour certains objets, il est question de transmettre des données de quelques octets, il n'est pas optimal ou intelligent de connecter ces objets en mode IP. D'où la naissance de certains protocoles qui permettent d'acheminer les données vers une passerelle. Ces passerelles sont accessibles via internet (connexion en mode IP). Les réseaux et protocoles IDO sont généralement classés en fonction de la portée de la communication, de la consommation énergétique des appareils, la durée de transmission des données, le débit, ... Dans cette section, nous parlerons de deux types de réseaux et de leurs protocoles catalogués à partir de la portée de transmission. Un aperçu est fourni dans le Tableau 1.

Les réseaux courte portée	Les réseaux Longue portée
Wifi	LTE-M (Long-Term Evolution for Machines)
Z-wave	NB-IOT (NarrowBand Internet of Things)
ZigBee	SigFox
Bluetooth Low Energy	LoRa
RFID	

Tableau 1 : Classement des technologies utilisées dans l'IDO

1) Les réseaux courte portée

Ces réseaux permettent le transfert de données sur de faibles distances. Ils sont beaucoup utilisés dans la domotique, dans le “wearable” (les objets connectés portables). Nous allons voir en détails les réseaux courte portée les plus connus.

➤ Le wifi

La norme IEEE 802.11, connue commercialement sous le nom de wifi, est devenue omniprésente dans la vie quotidienne. Plus d'un milliard de points d'accès Wi-Fi connectent à Internet près de cent milliards de dispositifs IDO[7]. Le succès du Wi-Fi est dû au grand nombre de données que ce protocole peut transférer. Il offre une liaison à haut débit et une connexion sans fil utilisant des ondes électromagnétiques. Il est la technologie idéale pour connecter certains appareils comme des caméras de surveillance, des imprimantes à internet. Cependant, le Wi-Fi est très énergivore. Donc généralement, les objets connectés communicants à l'aide de cette technique ont besoin d'être connectés à un réseau électrique en permanence.

➤ Le Z-wave

Z-wave, une technique de communication sans fil à courte portée utilisée dans les réseaux de capteurs entre les appareils d'une maison intelligente, est mis au point par une société danoise Zensys en 2001[8]. Contrairement au Wi-Fi, le protocole Z-Wave peut fonctionner sur des appareils utilisant des piles comme source d'alimentation. Le protocole est composé d'une couche application, d'une couche de routage, d'une couche de transport et d'une couche physique(voir [Tableau 2](#)). Pour communiquer avec les nœuds du réseau, l'utilisateur envoie les commandes au contrôleur par le biais d'un téléphone mobile et ce dernier les transmet aux nœuds.

Couche	Description
couche application	Responsable du contrôle de la charge utile des trames reçues ou transmises
couche routage	Gère le routage des trames, la mise à jour des tables de routage
couche transport	Gère l'envoi et la réception des trames et l'accuse de réception
couche physique	Gère la modulation, l'affectation des canaux RF et la synchronisation de la réception.

Tableau 2 : Les différentes couches et leurs descriptions du protocole Z-Wave

➤ **Le ZigBee**

ZigBee fait partie des technologies sans fil qui partagent la bande ISM(Industrielle, scientifique et médicale) sans licence avec des taux de transmission de données avoisinant les 250 Kbits/s[9]. Le faible débit noté s'accompagne d'une portée de transmission pouvant atteindre +300m sans obstacle et 70 à 100m dans le cas contraire[10]. Quelques caractéristiques de la technologie sont résumées dans le Tableau 3. ZigBee est basé sur la norme IEEE 802.15.4 qui définit la couche physique et la couche Mac. À l'instar des protocoles de courte portée, ZigBee est beaucoup utilisé dans les maisons intelligentes.

Solution	La description
Protocole réseau	Zigbee PRO 2015 (ou plus récent)
Topologie de réseau	MESH autoformant et auto-cicatrisant
Types de périphériques réseau	Coordonnateur (capable de routage), routeur, périphérique d'extrémité, périphérique d'alimentation verte Zigbee
Taille du réseau (nombre théorique de nœuds)	Jusqu'à 65 000
Technologie radio	IEEE 802.15.4-2011
Bande de fréquence / Canaux	2,4 GHz (bande ISM) 16 canaux (2 MHz de large)
Débit de données	250 Kbits/s
Modèles de sécurité	Centralisé (avec prise en charge des codes d'installation) Distribué
Prise en charge du chiffrement	AES-128 à la couche réseau AES-128 disponible à la couche application
Portée de communication (moyenne)	Jusqu'à 300+ mètres (ligne de mire) Jusqu'à 75-100 mètres en intérieur
Prise en charge de faible puissance	Sleeping End Devices Zigbee Green Power Devices (récupération d'énergie)
Prise en charge des profils hérités	Les appareils Zigbee 3 peuvent rejoindre les réseaux de profils Zigbee hérités. Les anciens appareils peuvent rejoindre les réseaux Zigbee 3 (en fonction de la politique de sécurité du réseau)
Prise en charge des périphériques logiques	Chaque périphérique physique peut prendre en charge jusqu'à 240 points de terminaison (périphériques logiques)

Tableau 3 : Spécifications techniques ZigBee[10]

➤ **Bluetooth Low Energy**

Une dizaine d'années après la naissance du Bluetooth en 1999, le Bluetooth basse consommation (Bluetooth Low Energy en anglais) voit le jour. À l'origine, il a été conçu par Nokia sous le nom de Wibree. Cette technologie n'est pas venue remplacer le Bluetooth classique mais elle répond mieux à un certain besoin. En effet, elle est caractérisée par une faible consommation énergétique, une courte portée et une faible quantité de données. Ses caractéristiques lui ont valu d'être adéquate pour certains objets connectés comme les montres, les bracelets,....

Le BLE dispose de différents types de connexions. Un objet connecté en BLE peut avoir jusqu'à 4 fonctions différentes[11] :

- ✚ Le « Broadcaster » : il peut faire office de serveur. Ainsi, il a pour objectif de transmettre régulièrement des données à un appareil, mais il n'accepte aucune connexion entrante.
- ✚ « L'Observer » : Dans un deuxième temps, l'objet peut seulement écouter et interpréter les données envoyées par un « broadcaster ». Dans cette situation-là, l'objet ne peut pas envoyer de connexions vers le serveur.
- ✚ Le « Central » : souvent un smartphone ou une tablette. C'est un élément qui interagit de deux façons différentes : soit en mode advertising, soit en mode connecté. Il est alors le dirigeant et c'est de lui que part l'échange de données.
- ✚ Le « Peripheral » : il accepte les connexions du central et lui envoie des données de manière périodique. Ce système a pour objectif de packager les données de façon universelle via le protocole afin qu'elles soient comprises par les autres périphériques.

➤ **La RFID**

Un système RFID (Radio frequency identification) offre la possibilité d'identifier automatiquement des objets en utilisant des ondes électromagnétiques. En effet cette technologie permet de récupérer des informations sur des objets grâce aux étiquettes, pouvant communiquer par onde radio, apposées sur les objets en question. Les étiquettes sont caractérisées par un identifiant et sont appliquées aux objets. Les lecteurs déclenchent un signal approprié qui représente une requête pour la présence éventuelle d'étiquette et pour la réception de leurs identifiants[4].

➤ **Le EnOcean**

EnOcean est une technologie sans fil permettant d'exploiter des sources d'énergie (mouvement des portes et des fenêtres ou des composants de machines, vibration des moteurs, changements de température ou variations du niveau de luminosité,..) inutilisées[12]. Les modules sans fil d'EnOcean tirent leurs énergies du milieu environnant grâce à des minuscules convertisseurs d'énergie rendant ainsi le fonctionnement d'objet sans piles ni connexion à un réseau électrique possible. EnOcean permet d'alimenter des technologies émettant des signaux à courtes portées.

2) Les réseaux longue portée

Ces réseaux permettent à des objets de communiquer sur une distance pouvant atteindre des dizaines de kilomètres. Ils sont beaucoup utilisés dans les villes intelligentes. Les réseaux longue portée peuvent être classés en deux catégories ceux s'appuyant sur les réseaux mobiles existants communément appelés les réseaux cellulaires et les réseaux non cellulaires comme SigFox, LoRa, dédiée à l'internet des objets.

➤ Les réseaux cellulaires

Les réseaux cellulaires constituent des options pour connecter les objets à l'internet. Ils offrent une couverture réseaux beaucoup plus large. Ainsi une réutilisation de l'infrastructure physique permet un développement rapide des objets connectés. Les réseaux cellulaires sont très adaptés aux application "critiques" dont la transmission de données en temps réel est primordiale et les applications transmettant une quantité importante de données. Mais ces avantages s'accompagnent d'une forte consommation énergétique des appareils. Les réseaux cellulaires dédiés les plus connus sont LTE-M (Long-Term Evolution for Machines) et NB-IOT (NarrowBand Internet of Things). Conçu pour les objets connectés, le LTE-M utilise le réseau 4G et fonctionne sur les fréquences basses (de 800 MHz) grâce au protocole CAT-M1. Le LTE-M optimise également la consommation énergétique de ces objets grâce à la mise en veille (Power Saving Mode). C'est aussi une solution sécurisée puisqu'elle utilise l'authentification des cartes SIM. Quant à NB-Iot, il fonctionne sur le réseau GSM (Global system for mobile communication). Il permet d'avoir des débits de 20 à 250Kbit/s.

➤ Les réseaux non cellulaires

Ce sont des réseaux permettant de faire transiter des quantités de données modestes mais sur une longue distance. Ils sont caractérisés par une faible consommation énergétique des appareils. Les plus connus sont SigFox et Lora. Ces deux réseaux sont développés dans le chapitre suivant.

V. Impact des objets connectés

Les champs d'application de l'internet des objets s'élargissent de jour en jour. Les services rendus par les objets connectés offrent des meilleures solutions en terme de bien être, de gestion des ressources énergétique, de gestion des trafics routiers, d'agriculture irriguée, de surveillance, de gestion des catastrophes et crises, etc. Ainsi nous allons voir les principaux secteurs impactés par les objets connectés.

1) La santé

L'internet des objets à révolutionner plusieurs secteurs, le domaine médical n'échappe pas à la règle. En effet, l'internet des objets permet aux organismes médicaux de se doter des appareils avancés avec la connexion des équipements tels que les IRM et les scanners de tomographie à internet et à d'autres infrastructures du réseau. Ce qui assure une analyse et une visualisation des données est par la même occasion une maintenance préventive de ces appareils. Les dossiers médicaux des patients sont essentiels pour prodiguer des soins de qualité. Les objets connectés offrent la possibilité aux soignants d'avoir accès, de n'importe où et à n'importe quel moment, aux informations des patients. Grâce aux objets connectés, la surveillance des patients à distances peut devenir simple et facilitera le travail des médecins. Ils peuvent intervenir avant qu'une situation critique ne se présente.

2) Villes intelligentes et domotique

«Une Ville Intelligente et durable est une ville innovante qui utilise les technologies de l'information et de la communication et d'autres moyens pour améliorer la qualité de la vie, l'efficacité des opérations et des services urbains et la compétitivité, tout en veillant à ce qu'elle réponde aux besoins des générations actuelles et futures. aux aspects économiques, sociaux et environnementaux » est la définition fournie par l'union internationale des télécommunications (UIT)[13]. Et quant à la domotique c'est un ensemble de technique permettant d'automatiser certaines taches et une gestion efficace des ressources de l'habitat. Ces deux domaines font

partie de ceux profondément impactés par l'avènement de l'internet des objets. Les objets connectés sont utilisés pour réduire la consommation de ressources (électricité et eau). Avec des détecteurs de présence, des détecteurs de flammes, des portes, des réfrigérateurs, des ampoules tous connectées, les maisons deviennent plus confortables et plus sûres et la gestion des ressources énergétiques et hydrauliques est meilleure. Grâce à l'omniprésence des capteurs et systèmes connectés, les politiques de développements des villes seront centrées sur les technologies avec :

- L'éclairage public intelligent qui peut s'adapter avec le mouvement des piétons et des conducteurs.
- L'environnement intelligent par exemple un service de surveillance de qualité de l'air.
- Les parkings intelligents pour fournir des informations en temps réel sur les places de stationnement libres
- La gestion intelligente des déchets avec des poubelles connectées qui renseignent sur leurs niveaux de remplissages.

3) Agriculture et Elevage

L'agriculture et l'Élevage font partie des secteurs qui bénéficient des avantages de l'internet des objets. Du fait de la croissance démographique mondiale, les agriculteurs et éleveur doivent posséder de nouveaux outils ou optimiser leurs outils de travail pour augmenter leur production. Des capteurs sont utilisés pour collecter des données qui peuvent être le taux de croissance et l'hydratation des plantes, l'humidité du sol ... afin de les analyser pour des recommandations. Et en plus ces données peuvent servir à la mise en marche des systèmes d'irrigation intelligentes. Des robots intelligents servent également au désherbage grâce à un système de guidage contrôlé par intelligence artificielle. Dans le domaine de l'élevage, le "collier connecté" permet de renseigner l'éleveur sur l'état de l'animal et sur son comportement. Des informations telles qu'un éventuel trouble d'alimentation du bétail, la température corporelle, la période d'ovulation ou de gestation peuvent être collectées par des capteurs apposés sur le bétail.

4) Industrie

L'internet des objets a également pénétré le secteur industriel. Un nouveau concept est même né, il s'agit de l'internet des objets industriel (IIOT). Avec l'internet des objets, la maintenance prédictive devient possible en identifiant en amont des signes annonciateurs de panne. Agir de manière proactive pour la réparation des machines de production dans une usine ou augmenter la probabilité d'éviter une panne augmenterait considérablement la production. L'optimisation des ressources et une bonne gestion des ressources sont cruciales pour dans le secteur industriel. L'internet des objets offre des solutions allant dans ce sens comme l'activation de l'éclairage que si c'est nécessaire, faire des alertes lorsqu'on approche d'une rupture de stock. La sécurité des biens et des personnes dans le secteur industriel peut aussi être renforcée par l'internet des objets avec des caméras connectées, des détecteurs de mouvement, de fumée, ...

VI. Les défis de recherches

Pour que l'internet des objets connaisse le succès connu par les services (web, mail, transfert de fichier) de l'internet un certain nombre de défis doit être relevé.

L'internet repose sur le protocole IP et par ricochet l'internet des objets aussi. La rareté des adresses IP commence à se faire sentir[14]. Alors pour pallier à ce problème, il est nécessaire d'accélérer la migration vers le protocole IPv6 qui dispose plus d'adresse que IPv4.

Parfois dans l'écosystème des objets connectés plusieurs appareils issus de fabricant où constructeurs différents sont appelés à échanger des données. L'interopérabilité est un gros challenge à relever par les acteurs pour accentuer le développement de l'internet des objets.

Vue le nombre important d'objets connectés communicants entre eux, avec leur environnement et avec l'homme et délivrant des données issues du monde réel. Divers problèmes pourraient se poser au niveau de l'exploitation de ces objets et de la gestion de la communication, du stockage et de l'analyse en temps réel. Quand on parle d'analyse en temps réel, nous pensons à la collecte, au traitement et à la valorisation des gigantesques données produites par les objets

connectés. De nouvelles plateformes applicatives pour gérer les objets connectés et manipulés les données doivent voir le jour. Ainsi de nouvelles méthodes de conception, de développement, de débogage et de maintenance permettraient la naissance de nouveaux usages des objets.

Un des défis majeurs de l'internet des objets est lié à la sécurité. Les objets connectés utilisent le plus souvent une connexion sans fil ce qui pourrait constituer une aubaine pour les hackers. Les appareils connectés deviennent vulnérables aux logiciels malveillants et les données issues des objets connectés ne sont pas aussi à l'abri du vol. Et en plus les objets peuvent être la porte d'entrée des pirates pour attaquer d'autres systèmes dans le réseau. Il est donc plus que nécessaire de penser à des mécanismes de sécurisation des objets et des données

VII. La normalisation dans l'IDO

L'internet des objets est un domaine en pleine croissance. Il attire de plus en plus de constructeurs, de chercheurs et les objets connectés croissent d'une manière exponentielle. Pour une croissance durable des objets connectés, un cadre de référence commun doit être établi afin de concevoir des systèmes fiables et sécurisés. C'est dans ce sens que l'ISO (l'organisation internationale de normalisation) et la CEI (la Commission électrotechnique internationale) ont mis en place un organisme de mondialisation internationale pour l'élaboration de la norme ISO/IEC 30141[15]. Cette norme fournit une architecture de référence d'IDO standardisée utilisant un vocabulaire commun, des conceptions réutilisables et les meilleures pratiques de l'industrie. En plus de cette coorganisation, il existe d'autres organisations indépendantes de normalisation spécifique à chaque technologie de l'internet des objets. Parmi elles, nous pouvons citer :

- **Connectivity standard alliance**, créée en 2002 oeuvre pour la création et l'évolution de norme ouverte universelle[16]. Cette organisation est derrière la ZigBee Alliance pour la normalisation du protocole Zig Bee.
- **IEEE** (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens) est une grande organisation professionnelle technique au monde dédiée à l'avancement de la technologie au profit

de l'humanité[17]. L'IEEE est responsable de plusieurs normes dont IEEE 802.11 (Wi-Fi).

- **3GPP** (3rd Génération Partnership Project) réunit sept(07) organisations de développement de normes de télécommunications (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), connues sous le nom de « partenaires organisationnels » et fournit à leurs membres un environnement stable pour produire les rapports et Spécifications qui définissent les technologies 3GPP[18].
- **LoRa-Alliance** est une association à but non lucratif du secteur technologie, engagé à promouvoir et à développer la technologie Lora. Elle établit les normes pour assurer l'évolution et l'interopérabilité de Lora.

VIII. Conclusion

Les technologies de l'internet des objets deviennent de plus en plus incontournable. Elles sont intégrées dans tous les domaines de la vie. Certains experts vont jusqu'à qualifier l'internet des objets comme la troisième révolution informatique. Son évolution s'accompagne de nouveaux défis à relever. Les cas d'utilisation de l'internet des objets s'élargissent occasionnant la naissance de nouvelles technologies comme Lora, Sigfox, NB-IOT qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : LES TECHNOLOGIES LPWAN

I. Introduction

L'expansion de l'internet des objets crée de nouvelles exigences imposées par les applications. Or les réseaux traditionnels en l'occurrence les réseaux cellulaires et les réseaux sans fil courte portée ne couvrent pas l'ensemble des applications dans le cadre de l'internet des objets. Les technologies LPWAN (Low Power Wide Area Network) sont apparues pour combler le gap de couverture des applications de l'internet des objets. Et d'ailleurs, les réseaux LPWAN connecteront un quart des appareils à l'internet [19]

Nous allons sortir certaines caractéristiques propres aux réseaux LPWAN, après cela nous aborderons trois technologies les plus populaires des réseaux LPWAN à savoir LoRa, Sigfox et NB-IOT et effectuons une comparaison entre ces trois technologies avant de conclure ce chapitre.

II. Caractéristiques des LPWAN

La popularité des technologie LPWAN est principalement liée à la longue portée des transmissions, la faible consommation énergétique et le faible coût des appareils. Ces caractéristiques rendent les technologies LPWAN adaptées à une pléthore de scenario d'application de l'internet des objets. Comparées à d'autres technologies sans fil, les technologies LPWAN sont plus économes en énergie avec un débit de données plus faible comme le montre la [Figure 4](#). Nous développons dans cet ordre la portée de la transmission, la faible consommation énergétique, et le faible coût des appareils.

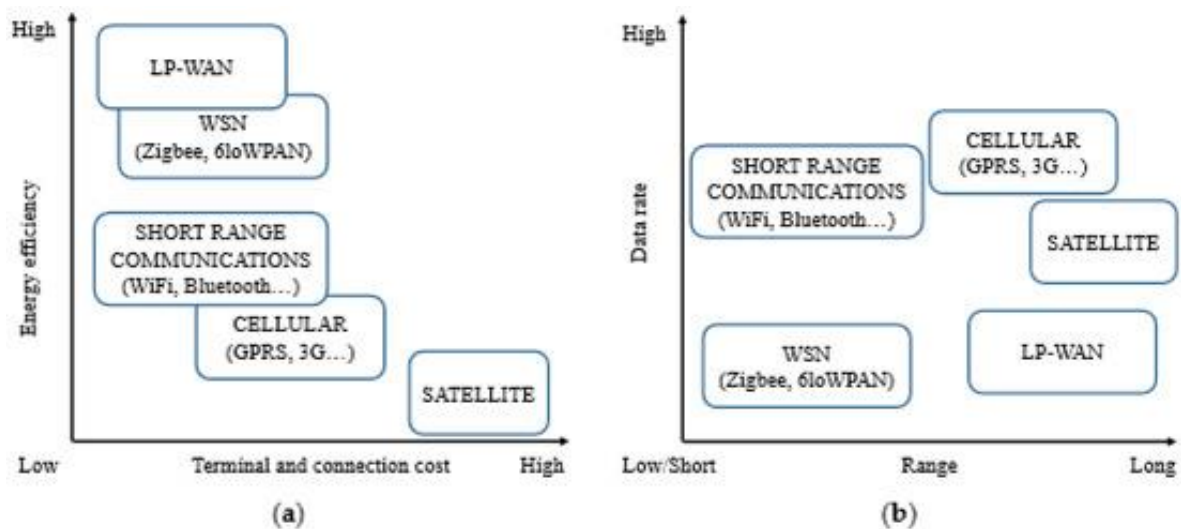


Figure 4 : Le positionnement des LPWAN par rapport à d'autres technologies sans fil[20]

1) Longue portée

C'est l'une des caractéristiques les plus importantes des réseaux LPWAN. Contrairement aux technologies courte portée (wifi, ZigBee, ...), dans un réseau LPWAN les appareils peuvent transmettre des données sur des kilomètres en zone urbaine et des dizaines de kilomètre en zone rurale [19]. L'utilisation de la bande sub-1GHz et des techniques de modulations concourent à l'obtention de la transmission à longue portée. En effet, dans la bande 1GHz, les signaux subissent moins d'atténuation et d'évanouissement, en plus cette bande est moins encombrant que le bande 2.4 GHz (utilisée par wifi, les téléphone sans fil, Bluetooth ...). En général deux schémas de modulation sont utilisés dans les réseaux LPWAN. Il s'agit des techniques à bande étroite et à spectre étalé. Les techniques de modulation à bande étroite code le signal dans une faible largeur de bande en général moins de 25 KHz. Le niveau de bruit à l'intérieur des bandes est aussi faible et le spectre global est partagé entre plusieurs liaisons. C'est dans ce sillage qu'est né Ultra Narrow band (UNB). Cette technique est utilisée dans SIGFOX, la largeur de bande avoisine les 100Hz. A l'inverse de la modulation à bande étroite, la modulation par étalement de spectre permet de répartir un signal à bande étroite sur une bande de fréquence

plus large d'où son nom. Le signal est plus résistant aux interférences et aux attaques de brouillages. LoRa utilise cette technique de modulation.

2) Faible consommation

La faible consommation énergétique est essentielle pour une meilleure exploitation des technologies LPWAN. La majeure partie des appareils de l'internet des objets est alimentée par batterie alors une longue durée de vie de celle-ci permet de réduire le coût de la maintenance. Les paramètres suivants permettent de respecter cette caractéristique :

- **Topologie** : Les terminaux sont directement et uniquement connectés aux passerelles, le résultat est une topologie en étoile (Figure 5). Dans cette topologie, les terminaux ne perdent pas d'énergie précieuse en écoutant d'autres terminaux qui souhaitent transmettre en passant par eux.

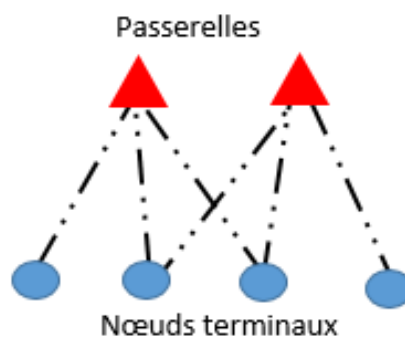


Figure 5 : Topologie en étoile

- **Cycle de service** : Il consiste à des fonctionnements périodiques des terminaux. Autrement dit, il existe des intervalles de temps où les terminaux sont en modes veilles qui peuvent survenir à la suite d'une transmission. Le cycle de service permet de réduire drastiquement la consommation énergétique des appareils. Les terminaux conviennent avec les passerelles les moments d'émission et de réception. Certaines technologies LPWAN comme LoRa se passent de ce mécanisme notamment avec la classe C de LoRa.

- **Protocole d'accès au medium simplifié** : Plusieurs technologies LPWAN, telles que SigFox et LoRaWAN, ont recours à ALOHA, un protocole MAC à accès aléatoire dans lequel les terminaux transmettent sans recourir à la détection de porteuse, rendant leurs émetteurs-récepteurs simples et peu coûteux.

3) Faible coût

La ruée vers les technologies LPWAN est quasiment dû au faible coût des appareils. Plusieurs moyens sont utilisés pour réduire les dépenses d'investissements pour les utilisateurs finaux. En effet, les émetteurs-récepteurs LPWAN doivent traiter des formes d'onde moins complexes. Cela leur permet de réduire l'encombrement de l'émetteur-récepteur, les débits de données de pointe et la taille de la mémoire, ce qui minimise la complexité du matériel et, par conséquent le coût. Une seule station de base LPWAN permet de connecter des dizaines de milliers d'appareils finaux distribués sur plusieurs kilomètres, ce qui réduit considérablement les coûts pour les opérateurs de réseaux. Les technologies LPWAN utilisent des bandes sans licence ou de bandes sous licence appartenant à l'opérateur, ce qui diminue aussi le coût.

4) Evolutivité

L'évolutivité consiste à la prise en charge d'un grand nombre de dispositif envoyant de faible volume de données. Un grand nombre d'appareil connectés sur un même milieu pose des problèmes d'utilisation efficaces du canal, d'interférences entre les nœuds finaux et les stations de bases.

III. Technologies existantes

Dans cette section nous aborderons les technologies LoRa, SIGFOX et NB-Iot. Nous avons choisi ces trois technologies car ce sont les leaders dans la transmission longue portée [20]. Chacune de ces technologies peuvent faire l'objet d'un mémoire néanmoins nous donnerons les

caractéristiques et spécificités de chacune d'elle. Quelques propriétés de ces technologies sont consignées dans le Tableau 4.

Caractéristique	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Fréquence	Bandes ISM sans licence (868 MHz en Europe, 915 MHz en Amérique du Nord, et 433 MHz en Asie)	Bandes ISM sans licence (868 MHz en Europe, 915 MHz en Amérique du Nord, et 433 MHz en Asie)	Bandes de fréquences LTE sous licence
Largueur de bande	100 Hz 200 kHz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Débit maximal	100 bps	50 kbps	200 kbps
Maximum messages par jour	140(UL), 4(DL)	Illimité ¹	Illimité ¹
Longueur maximale de la charge utile	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Portée de transmission	10 km (urbain), 40 km (rural)	5 km (urbain), 20 km (rural)	1 km (urbain), 10 km (rural)
Normalisation	La société Sigfox collabore avec l'ETSI sur la normalisation du réseau basé sur Sigfox	LoRa-Alliance	3GPP

Tableau 4 : caractéristiques des technologies LPWAN : Sigfox, LoRa et NB-IoT.

¹ Tout en respectant la restriction du "Duty cycle" applicable à la bande ISM

1) LoRa

La couche physique des technologies LoRa est appelée LoRa. Elle utilise la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) dans la bande de fréquence ISM (Industriel, scientifique et médical) sans licence. Les paramètres influant dans la modulation sont le facteur d'étalement (spreading factor SF), la largeur de bande (bandwidth) et le taux de codage (code rate). La communication est basée sur le protocole LoRaWAN qui utilise ALOHA pour gérer l'accès au canal. Trois modes de fonctionnement (classes) sont définis pour couvrir un ensemble d'applications dans le cadre de l'ID0. La technologie LoRa est l'objet du chapitre suivant.

2) SigFox

A l'instar de LoRa, SIGFOX exploite la bande de fréquence sans licence. Sigfox utilise la modulation par déplacement de phase binaire différentielle (en anglais Differentials Binary Phase-Shift Keying D-BPSK) pour laquelle le message a une bande passante fixe de 100Hz. Ce type de modulation dite bande ultra-étroite (ultra-narrow-band UNB). La modulation UNB nécessite une faible consommation énergétique, avec une portée de transmission pouvant atteindre des dizaines de kilomètres et un débit de données faible. Sigfox, en tant que société, offre une solution de communication basée sur un logiciel, où toute la complexité du réseau et de l'informatique est gérée dans le Cloud, plutôt que sur les appareils[21]. L'architecture de Sigfox est composée de nœuds et des stations de bases sigfox qui jouent le rôle de passerelles (voir [Figure 6](#)). Les nœuds finaux du réseau communiquent avec des stations de bases propriétaires déployées par l'opérateur réseau Sigfox. A ces débuts, la communication n'était possible que dans un seul sens des nœuds vers les stations de bases (liaison montante). Le nombre de message maximum pour la liaison montante (uplink) est de 140 messages par jour. Et 04 messages par jour sont autorisés sur la liaison descendante (downlink) c'est-à-dire des stations de base vers les nœuds Sigfox. Cela montre qu'un accusé de réception n'est pas nécessaire à la suite d'une transmission dans la liaison montante dans un réseau Sigfox. Pour assurer la fiabilité des transmissions, les appareils finaux duplique le message en trois (nombre par défaut) avant de les transmettre sur des canaux différents [22].

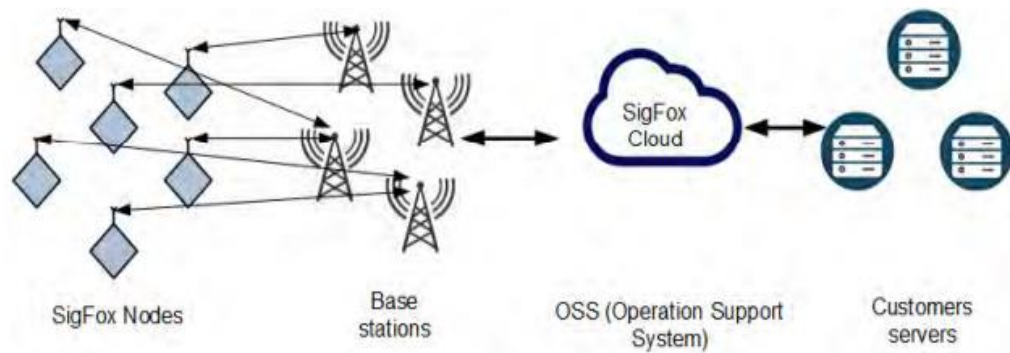


Figure 6: Architecture Sigfox[23]

3) NB-IoT

Autrefois, les réseaux cellulaires étaient utilisés que pour la téléphonie. Avec l'avènement de l'internet des objets, ils s'adaptent et s'orientent vers la connexion des objets. C'est dans ce contexte qu'est né le Narrowband Internet of Things (NB-IoT). La technologie NB-IoT peut fonctionner avec le réseau GSM (Global system for mobile communication) ou avec le réseau LTE (Long Term Evolution). NB-IoT occupe une bande passante de 200KHz et utilise la modulation Quadrature phase-shift keying (QPSK) autrement dit modulation par changement de phase. Le débit maximal est de 200 kbps et de 20 kbps sur les liaisons descendante et montante respectivement, avec 1600 octets de charge utile dans chaque message. La 3rd Génération Partnership Project (3GPP) est l'organisme en charge de la normalisation de NB-IoT et recommande une intégration de NB-IoT en conjonction avec la LTE. A l'image des deux technologies développées précédemment. La NB-IoT permet une transmission à longue portée en connectant les objets à l'antenne relais des opérateurs et répond au critère d'évolutivité en pouvant prendre en compte 100 000 objets par cellule ou par antenne relais. La [Figure 7](#) présente l'architecture globale de NB-IoT. Les données issues des objets connectés sont relayées par des stations de bases améliorées (eNodeBS) vers les entités MME (Mobility Management Entity). A partir des MME, elles sont transférées à la passerelle de réseau de données par paquets (PGW) via la passerelle de service (SGW) ou à la fonction d'exposition de capacité de service (SCEF),

qui n'est toutefois possible que pour les paquets de données non IP. De là, ils sont finalement transmis au serveur d'applications ou aux services IDO.

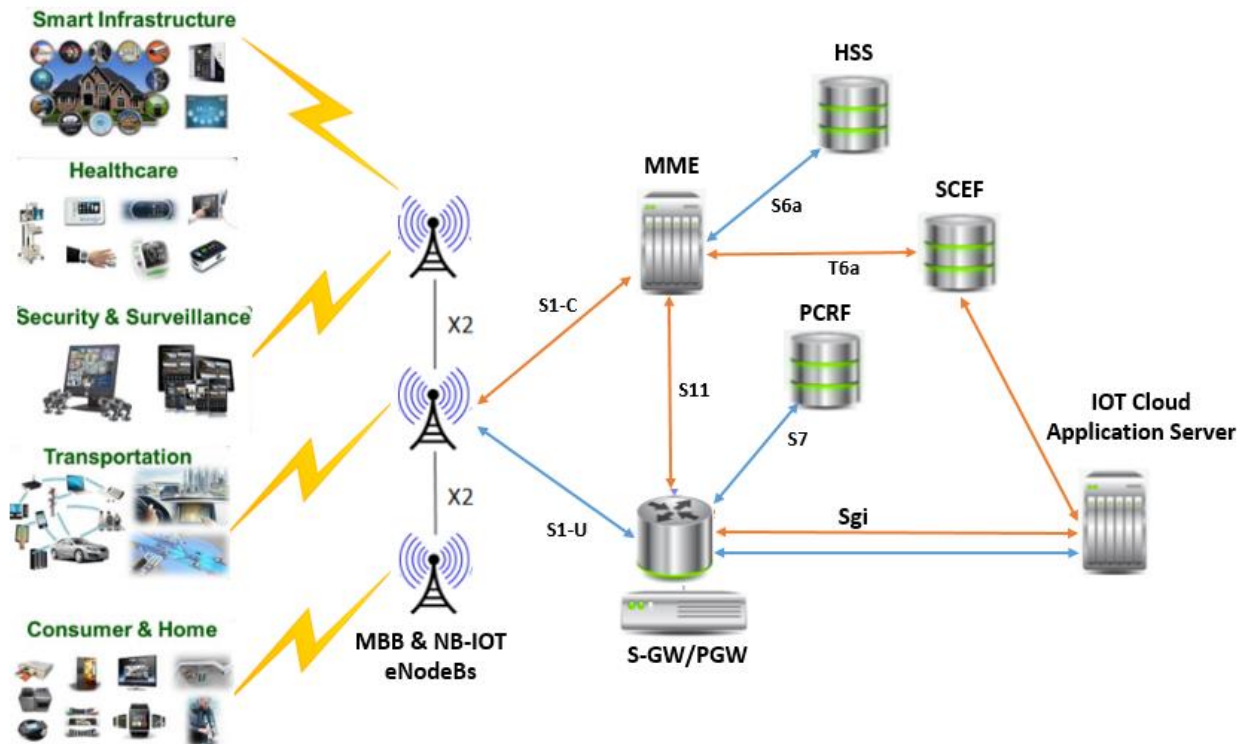


Figure 7 : Architecture de réseau NB-IoT[24]

IV. Comparaison entre les technologies

Pour chaque application de l'internet des objets voulant s'appuyer sur les réseaux LPWAN, il existe une technologie plus adaptée que les autres. Le choix se fait en prenant compte les facteurs suivants : la portée de la transmission, la couverture réseau, la charge utile, la latence, la qualité de services (QoS), le coût et la consommation énergétique des terminaux. La [Figure 8](#) fournit un aperçu de la comparaison entre ces technologies. Dans ce qui suit, nous allons comparer les trois technologies développées ci-dessus en utilisant ces facteurs.

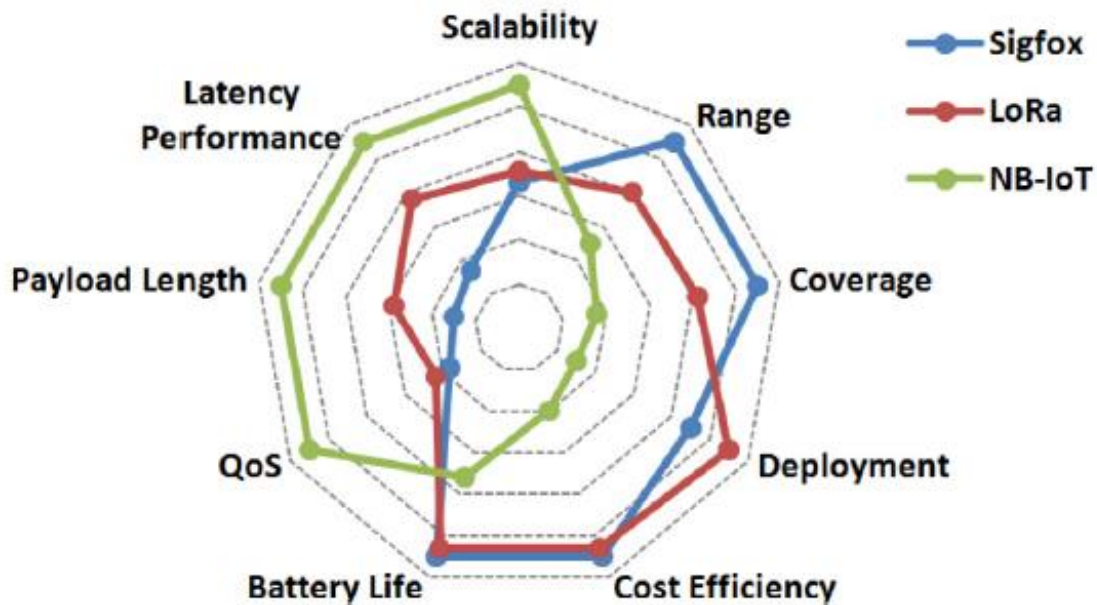


Figure 8 : Avantages respectifs de Sigfox, LoRa et NB-IoT[20]

1) Qualité de services (QoS)

La qualité de services permet de gérer le trafic sur les réseaux. LoRa et Sigfox opèrent sur la bande de fréquence sub-GHz sans licence et utilisent des communications asynchrones basés sur le protocole ALOHA. Ces deux réseaux sont conçus pour résister aux interférences et robuste contre l'affaiblissement de propagation. Néanmoins, la qualité de services est moins prise en compte que dans les réseaux NB-IoT. En effet, le NB-IoT évolue sur un spectre sous licence et un protocole de communication synchrone donc plus apte à intégrer la qualité de services.

2) Consommation énergétique

Les terminaux finaux sont souvent en mode veille dans les réseaux Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT. Ce fait permet de réduire drastiquement la consommation énergétique des nœuds finaux. Cependant, NB-IoT utilise plus de ressources énergétiques que LoRaWAN et SigFox. En effet

la prise en charge de la qualité de service et la communication synchrone sont sources de consommation énergétique de plus.

3) Portée de la transmission, Couverture réseau

La portée et la couverture réseaux sont étroitement liées. Une station de base Sigfox peut atteindre une portée avoisinante de 40km. Dans une situation où la portée de transmission est primordiale, SigFox est le meilleur candidat suivi par LoRa (portée > 20 km). La portée de transmission est moins importante avec NB-IoT mais Il présente un maillage très développé du fait qu'il est souvent intégré aux réseaux LTE.

4) Coût

Le Coût des appareils finaux, du déploiement et du spectre (licence) est un paramètre à ne pas négliger pour le choix de la technologie. Dans le Tableau 5 nous présentons une étude des coûts des différentes technologie LPWAN abordées dans ce chapitre.

	Coût du spectre	Coût du déploiement	Coût des appareils finaux
Sigfox	Sans licence	>4000 €/station de base	< 2€
LoRaWAN	Sans licence	>(100 – 1000)€/passerelle	3–5€
NB-IoT	> 500M€ / MHz	> 15000€/station de base	>20€

Tableau 5 : Coût des composants dans SigFox, LoRaWAN et NB-IoT[22]

V. Conclusion

Dans cette partie, nous avons traité les réseaux LPWAN à travers trois technologies LoRa, Sigfox et NB-IoT. Les réseaux LPWAN sont caractérisés par la portée de la transmission, la consommation d'énergie des terminaux, le coût des composants du réseau et l'évolutivité du réseau. En utilisant ces caractéristiques, une étude comparative a été effectuée entre Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT. Nous avons fait un bref zoom sur la technologie LoRa qui sera le thème du prochain chapitre.

Chapitre III : RESEAU LoRa

I. Introduction

Avec le développement fulgurant de l'internet des objets (IDO), les applications associées à l'IDO deviennent de plus en plus nombreuses et diversifiées. Ainsi certaines parmi elles nécessitent une transmission à longue portée avec des débits faibles d'où la naissance des réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Network). Les réseaux LoRaWAN font partie des réseaux LPWANs les plus porteurs d'espoir de l'exploitation des opportunités offertes par l'IDO. Dans ce chapitre, nous verrons l'architecture orientée réseaux dans LoRaWAN nous ferons la différence entre Lora et LoRaWAN ensuite le mécanisme ADR (adaptative Data Rate) et aborderons les travaux sur les déploiements linéaires de réseau LoRa ainsi que la problématique du sujet.

II. Architecture d'un réseau LoRa

À l'instar des réseaux LPWAN, le réseau LoRaWAN utilise la configuration topologique en étoile. L'architecture d'un réseau Lora est composée essentiellement de trois éléments :

- Des nœuds LoRa de base (End devices) : ce sont les nœuds les moins complexes du réseau. En fait, ils assurent la fonction de détection et de communiquer ces informations aux nœuds relais.
- Des nœuds de relais (Gateways) : Comme son nom l'indique, ce type de nœud sert à collecter les données envoyées par les nœuds de capteurs de base et les transmet aux nœuds de diffusion des données. Ils ont une interface leur permettant d'avoir une communication basée sur la TCP/IP.
- Des nœuds de diffusion des données (Network server) : Ce sont les nœuds qui assurent plus de fonctionnalités dans le réseau. Il permet d'administrer le réseau, constitue en même temps le point commun avec d'autres réseaux pour l'exploitation des données produites par les nœuds LoRa de base et supprimer les paquets redondants.

La Figure 9 montre ces différents éléments.

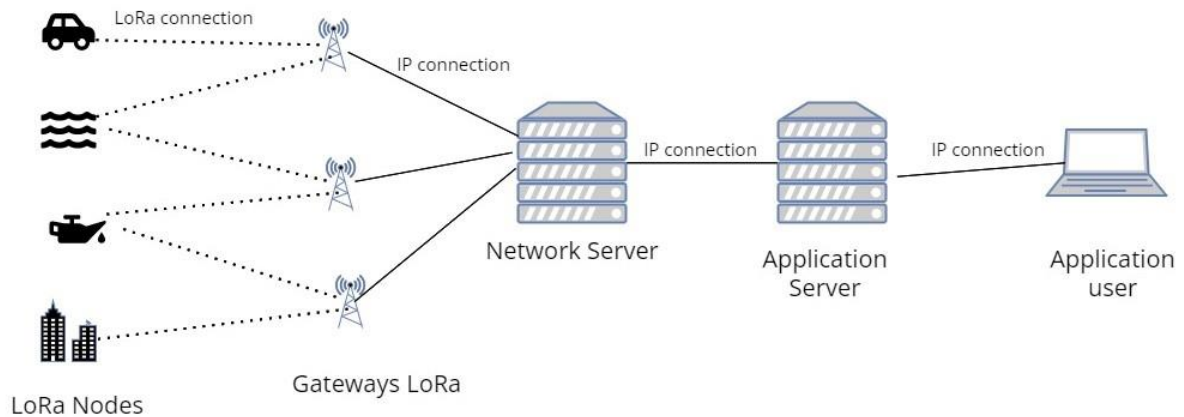


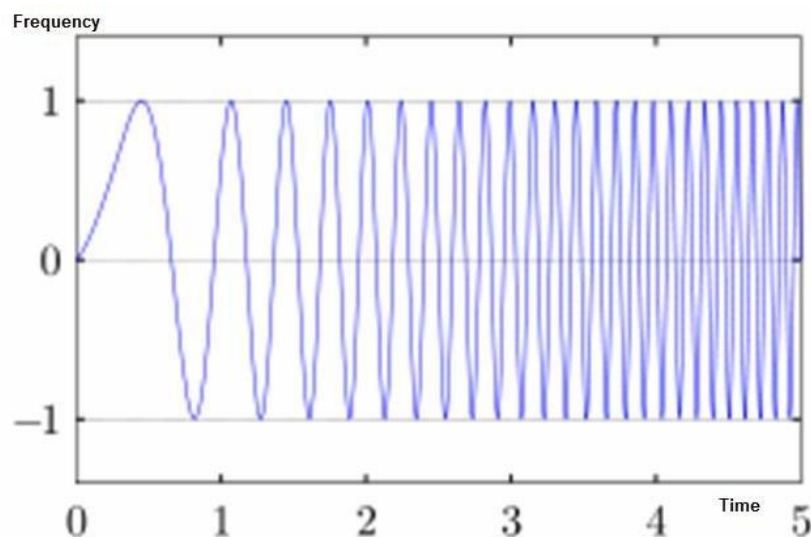
Figure 9 : Architecture classique LoRaWAN

III. LoRa vs LoRaWAN

Par abus de langage, nous disons LoRa pour désigner tout réseau intégrant des nœuds LoRa et qui a un mode de fonctionnement basé sur le protocole LoRaWAN. LoRa (Long Range) est la couche physique développée par CYCLEO qui est une entreprise française et rachetée par SEMTECH et LoRaWAN est un protocole MAC maintenu par LoRa Alliance. D'ores et déjà, La technologie LoRa est devenue le choix de plusieurs entreprises comme **Eddy Smart Home**, une entreprise nord-américain spécialisée, dans la fabrication et la commercialisation des technologies pour la surveillance de l'utilisation de l'eau dans les maisons. **KingTingTech** (YoSmart) est une entreprise de haute technologie focalisée sur le développement des maisons intelligentes. Cette société a développé des solutions avec la technologie LoRa pour collecter les données issues des thermostats avec des capteurs sans fil[25]. **Sensoterra** est une compagnie qui fournit aux agriculteurs le niveau d'humidité du sol dans les champs à l'aide des périphériques LoRa et de l'infrastructure du réseau LoraWAN de SENET[26] Dans la suite, nous concentrerons notre réflexion sur la couche physique LoRa et le protocole LoRaWAN.

1) La couche physique LoRa

LoRa représente la couche physique dans LoRaWAN et est basée sur la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) ou modulation à étalement de spectre qui utilise la technique Chirp (signal dans lequel la fréquence augmente (up-chirp) ou diminue (down-chirp) avec le temps) comme illustré à la [Figure 10](#). L'étalement de spectre est une technique qui permet de transmettre un signal d'information sur une largeur de bande plusieurs fois supérieure à la largeur de bande minimale nécessaire. Les signaux modulés ont une amplitude constante avec une fréquence variable [13]. La modulation à étalement de spectre permet de réduire la consommation énergétique et d'augmenter la résistance aux interférences. Dans LoRa, les signaux sont modulés dans la bande de fréquence ISM (Industriel, scientifique et médical) sans licence qui est variables selon la région (ex : 868 MHz en Europe, 915 MHz en Amérique Nord) [27]



[Figure 10](#): A linear frequency modulated upchirp in the time domain[28]

La performance des nœuds LoRa dépend essentiellement des paramètres suivants :

- Le facteur d'étalement (spreading factor)

Le facteur d'étalement noté SF (Spreading factor) est une grandeur définie par le rapport entre débits de chip et le débit de symbole. Un chip représente des impulsions d'un code à spectre étalé et un symbole représente plusieurs chips. Un chirp contient 2^{SF} bits par symbole. Dans un

réseau LoRaWAN le facteur d'étalement est un entier compris entre 7 et 12 [29]. Ce paramètre permet de varier la portée et le débit de transmission et d'envoyer simultanément sur un canal donné. Un facteur d'étalement élevé implique une longue portée de transmission est un débit faible [20] (voir Tableau 6).

Spreading factor (for UL at 125 KHz)	Bit rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air (for an 11-bytes payload)
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Tableau 6 : LoRa Spreading Factors[30]

- Largeur de bande (Bandwith).

Nous avons défini un chirp utilisé dans la modulation LoRa comme un signal dans lequel la fréquence varie. La fréquence de variation minimale et maximale est appelée largeur de bande. Des valeurs élevées de la largeur de bande occasionnent des débits de données importants[29]. Le temps de transmission d'un symbole (T_s), le facteur d'étalement (SF) et la largeur de bande (BW) sont liés par l'équation suivante :

$$T_s = \frac{2^{SF}}{Bw} [31]$$

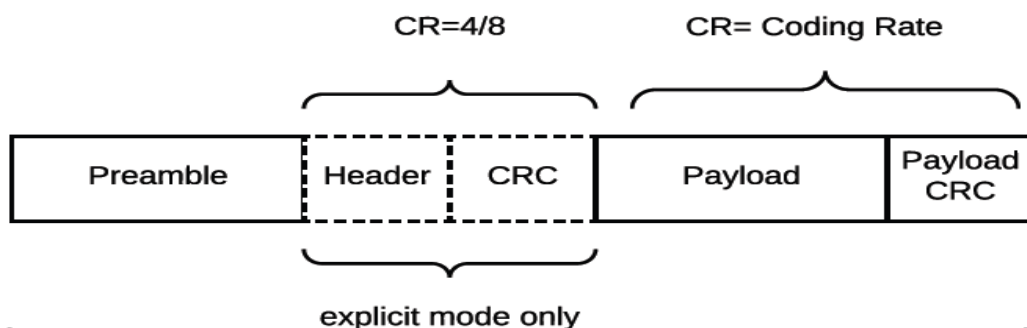
- Taux de codage (Code rate)

LoRa utilise la technique FEC (Forward error correction) pour la détection d'erreurs dans les trames transmises. Des bits supplémentaires sont ajoutés dans la trame plus précisément au niveau de la charge utile. Dans LoRa ces bits supplémentaires sont contrôlés par le taux de codage (CR). Les valeurs que peut prendre le taux de codage sont 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8[29]. Une valeur élevée du taux de codage augmente le temps d'antenne des nœuds et par conséquent une consommation énergétique plus importante des nœuds.

Ces paramètres cités précédemment affectent la portée de la transmission, le débit de données, la résistance aux interférences et au bruit et la capacité du récepteur à décoder le signal.

2) Le protocole LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) est un protocole ouvert proposé par LoRa Alliance (Organisme chargé de la promotion de LoRaWAN). Il correspond à la couche MAC (Medium access control) du modèle de référence OSI (Open Systems Interconnection). LoRaWAN est conçu pour connecter des objets équipés de module LoRa et alimentés par batterie en énergie à internet. Un réseau LoRaWAN est constitué par nœuds LoRa, des passerelles équipées de module LoRa et d'une interface permettant la connexion à internet et d'un serveur réseau, comme détaillé dans la section architecture. LoRaWAN utilise la technique d'accès au canal du type ALOHA[32] c'est-à-dire chaque nœud du réseau peut transmettre dès qu'il le souhaite. Nous distinguons deux types de liaison : une liaison montante (uplink) qui se produit quand un nœud transmet un message au serveur réseau et une liaison descendante (downlink) quand l'inverse se produit. Selon la spécification LoRaWAN, la transmission de données est exécutée sur plusieurs canaux. En effet, chaque appareil dispose 16 canaux au maximum qui peuvent être préconfigurés avant qu'un terminal rejoigne un réseau LoRaWAN. Parmi ces canaux, 6 sont obligatoires, les trois pour la transmission de données et les trois autres pour la liaison descendante lors de la procédure d'association. LoRa WAN vise essentiellement deux objectifs une transmission à longue portée et une consommation énergétique optimale des nœuds LoRa. Une trame LoRa est composée d'un préambule, d'un entête, de la charge utile et un champ de contrôle d'erreur. Si l'entête contient des informations à propos du CRC (contrôle de redondance cyclique) et du CR (Coding rate), la trame est dite explicite au cas échéant elle est implicite. Le format de la trame est consigné dans la [Figure 11](#).



[Figure 11](#) : LoRa frame structure[33]

La spécification LoRaWAN définit trois modes de fonctionnement des nœuds terminaux adaptés à des applications de l'IDO variées. Chaque mode de fonctionnement est communément appelé classe (**Voir Figure 12**). Nous allons voir ces différentes classes.

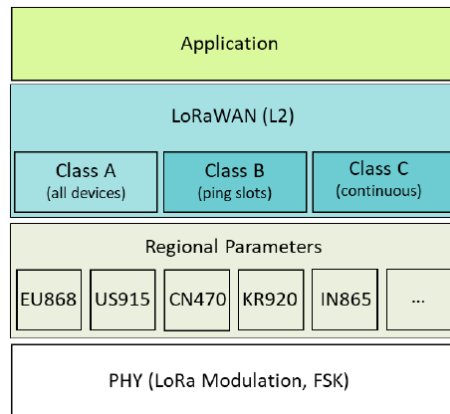


Figure 12 : LoRaWAN Classes[34]

a) Classe A

C'est la classe par défaut qui doit être implémentée par tous les nœuds terminaux du réseau LoRaWAN. Dans la classe A, le terminal envoie un message au serveur réseau (liaison montante) par un canal choisi au hasard parmi ceux configurés dans le terminal avec un débit de données, le nœud terminal ouvre deux fenêtres de réception RX1 et RX2 respectivement après une seconde et 2 seconde (valeurs par défaut) suivant la transmission de la liaison montante pendant lesquelles il attend la transmission du serveur (liaison descendante) comme illustré à la Figure 13. Si le serveur ne transmet pas, alors le message est re-envoyé. Le nombre limite de retransmission recommandé est de huit(8)[32]. Du fait des courtes fenêtre d'écoute, la classe A est celle la plus économe en énergie.

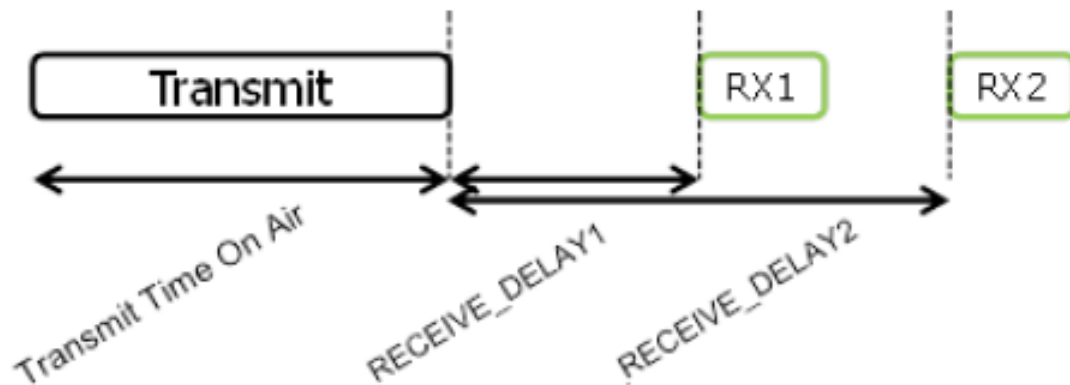


Figure 13 : : End-device receive-slot timing[34]

b) Classe B

Les terminaux où la classe B est activée consomment plus énergie que ceux implémentant la classe A car ces terminaux offrent plus de fenêtres de réception. Les fenêtres de réception (ping slot) sont ouvertes à des intervalles de temps réguliers afin d'activer la liaison descendante. Elles sont synchronisées à travers une balise diffusée dans le réseau pour fournir les références de synchronisation[34]. Le temps de synchronisation est appelé BEACON_PERIOD. En plus de ces caractéristiques spécifiques, la classe B implémente aussi le mode de fonctionnement de la classe A. Le fonctionnement de la classe B est illustré à la Figure 14.

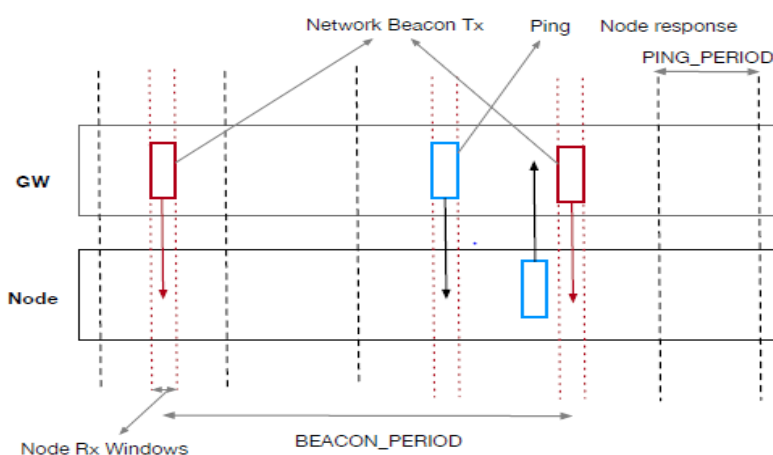


Figure 14 : Class B reception window and beacon timing[33]

c) Classe C

Les terminaux utilisant la classe C écoutent en permanence le canal pour recevoir éventuellement des messages du serveur réseau. Dans un terminal, on ne doit pas activer la classe C et la classe B simultanément [34]. Contrairement à la classe A qui ouvre seulement deux fenêtres de réception, la classe C ouvre en plus une fenêtre de réception RXC pour écouter continuellement (voir [Figure 15](#)).

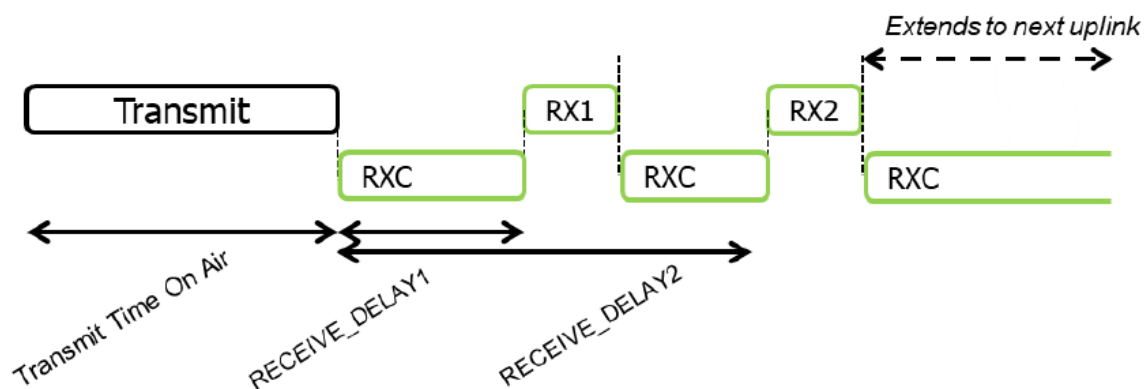


Figure 15 : Class C end-device reception slot timing[34]

IV. La communication dans LoRaWAN

Pour sécuriser le réseau et les données des utilisateurs, LoRaWAN définit des clés de sécurité avec un cryptage AES 128 [33] et des identifiants :

- Adresse du terminal (DevAddr) : Elle est sur 32 bits et permet au serveur réseau et au serveur d'applications d'identifier de façon unique les terminaux.
- Un identifiant unique du terminal : Elle est sur 64 bits et n'est pas dynamique contrairement à DevAddr. Elle est connue par le serveur d'applications pour l'activation des terminaux.
- Clé de session réseau (NwkSKey) : C'est une clé de session réseau utilisée pour crypter la communication entre le terminal et le serveur réseau.

- La clé de session d'application (AppSKey) : Elle n'est pas connue du serveur réseaux ; elle est partagée entre le serveur d'applications et le terminal. Elle permet de sécuriser les données spécifiques de l'application (la charge utile).

Pour que la communication puisse être possible entre composants d'un réseau LoRa, il faut nécessairement l'activation des terminaux qui peut se faire de deux manières différentes : Over-the-Air Activation (OTAA) et Activation by Personalization.

Pour la procédure OTAA, le terminal envoie une demande par message MAC de rejoindre le réseau au serveur réseau. Si ce dernier accepte la demande, une adresse dynamique DevAddr est attribuée au terminal, sinon le nœud ne pourra pas rejoindre le réseau. Le message de la demande jonction n'est pas crypté alors que la réponse du serveur réseau l'est. Les clés NwkSKey et AppSKey sont partagées avec le terminal. Ce processus permet au terminal de se déplacer entre différents réseaux LoRaWAN.

Quant à la procédure d'activation Activation by Personalization, elle ne nécessite pas une demande de jonction car les informations de communication sont directement stockées dans le terminal.

Après l'activation, les terminaux commencent à envoyer et recevoir des messages. Dans un réseau LoRa, Un message envoyé par un nœud est reçu par toutes les passerelles à portée du nœud. Deux types de message peuvent être échangés dans LoRaWAN, les messages confirmés nécessitent un accusé de réception et les messages non confirmés. Le message provenant du serveur réseau pour un nœud terminal est relayé par une seule passerelle choisie selon Received Signal Strength Indicator (RSSI) qui fournit une information de niveau de réception de la donnée. Le débit de données de transmission est variable et est géré par l'algorithme ADR (Adaptive data rate) qui est l'objet de la partie suivante.

V. L'algorithme ADR

Adaptive data rate est un mécanisme qui permet d'adapter le débit de données de chaque liaison dynamiquement en jouant sur les paramètres définis dans la couche physique de LoRa.

ADR vise à augmenter la capacité globale du réseau et optimiser la consommation énergétique des nœuds[35]. La dépense énergétique d'un nœud dépend du temps passé dans un état. Trois états sont possibles : transmission, réception et veille. L'ADR permet par exemple à un nœud situé tout près d'une passerelle de transmettre avec un facteur d'étalement faible ce qui réduira le temps de transmission et par ricochet la dépense énergétique du nœud. Le mécanisme ADR s'exécute de façon asynchrone au niveau du nœud LoRa et du serveur réseau. L'algorithme ADR s'exécutant sur le serveur réseau peut diminuer le facteur d'étalement et modifier la puissance de transmission tandis que celui s'exécutant sur le nœud LoRa ne peut qu'augmenter le facteur d'étalement. Le serveur réseau utilise la liaison descendante pour instruire le nœud à adapter le débit et la puissance de transmission en se basant sur la qualité du signal (signal-to-noise ratio SNR) de la dernière transmission de la liaison montante.

VI. Réseaux LoRa linéaires

La mise en place d'un réseau LoRa de façon globale et d'une manière particulière un réseau LoRa linéaire exige un compromis entre la couverture maximale de la zone et la consommation énergétique modérée des nœuds du réseau. Pour trouver le juste milieu, certaines recherches tirent profit de la linéarité de l'environnement ou de l'infrastructure en développant des protocoles MAC linéaire et des protocoles de routage adaptés et d'autres proposent des stratégies de déploiement des nœuds du réseau. La sécurité des nœuds est aussi un aspect crucial à prendre en compte lors de la conception d'un réseau LoRa. Même si l'exigence de la sécurité est en fonction des applications il est nécessaire de protéger ces systèmes contre les attaques telles que l'écoute clandestine, l'usurpation d'identité de la source, les rediffusions, la modification des messages, le déni de service, ...

Les applications de déploiement linéaires sont diverses et variées. Elles peuvent être :

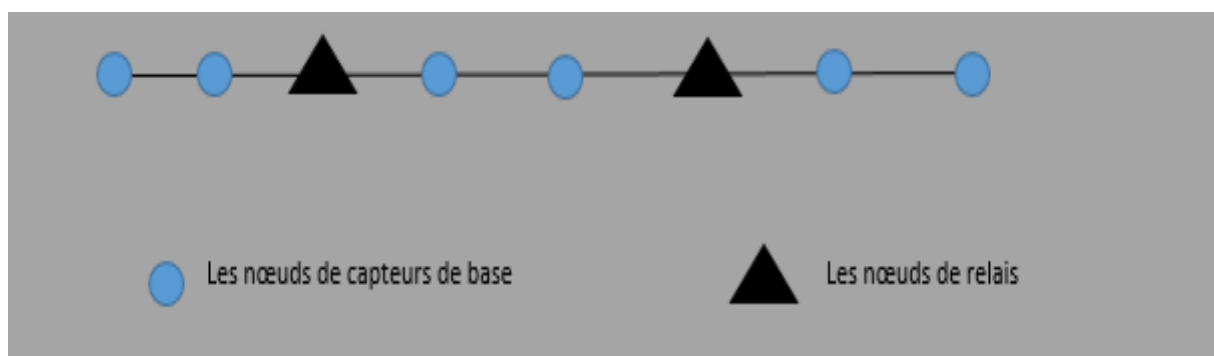
- La surveillance des frontières pour lutter contre le franchissement non autorisé des frontières, le trafic de stupéfiant, la contrebande
- Le contrôle et la surveillance des chemins de fer pour renforcer la sécurité des infrastructures ferroviaires

- La protection et la surveillance de gazoduc, oléoduc, aqueduc. Les pipelines présentent une structure pouvant s'étendre sur des dizaines de kilomètres. Le déploiement des capteurs tout au long des pipelines, qui renseigne sur la température, la vitesse d'écoulement, la pression du canal, permet de prévenir de possible panne, de faciliter la maintenance et d'éviter les accidents
- La surveillance des routes pour lutter contre les excès de vitesse, les accidents, les embouteillages.

Des explications plus détaillées sur les applications de déploiement linéaire sont fournis dans[36].

1) Généralités sur les déploiements des réseaux linéaires

Selon le déploiement géographique des nœuds LoRa de base et des nœuds de relais, nous pouvons distinguer deux types de catégorie. La première consiste à déployer sur un même axe les nœuds LoRa de base et les nœuds de relais ainsi nous avons un déploiement à un niveau (voir [Figure 16](#)). En général dans ce type de déploiement, les nœuds sont tous de mêmes caractéristiques et assurent fonction de détection et de routage des informations. La deuxième consiste à disposer les nœuds LoRa de base et les nœuds de relais sur deux niveaux différents (voir [Figure 17](#)). Dans ce cas-ci, les nœuds de relais ne pourront pas assurer la fonction de détection.



[Figure 16](#) : Déploiement linéaire à un niveau

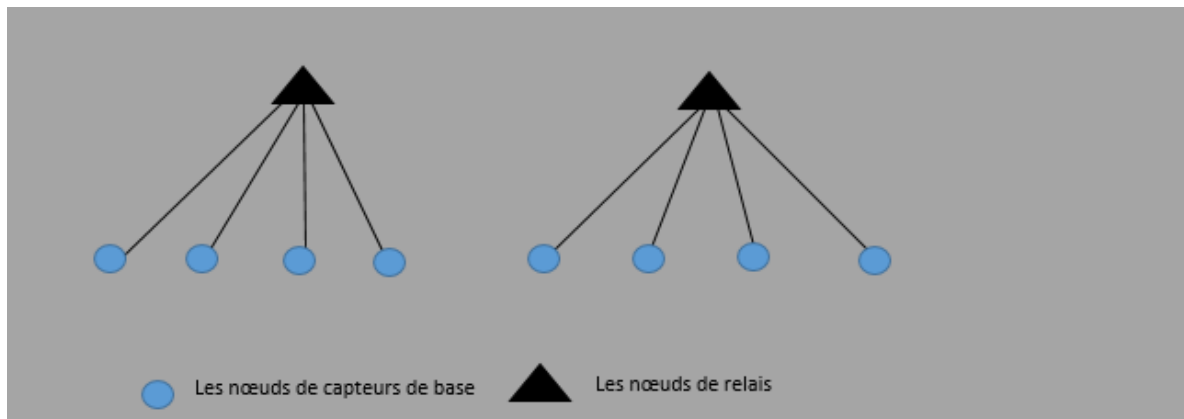


Figure 17 : Déploiement à deux niveaux

2) Travaux sur les réseaux LoRa linéaires

Des travaux ont été réalisés dans l'optique d'utiliser la technologie LoRa dans les réseaux de capteurs linéaires. Les études peuvent être résumés essentiellement en deux rubriques : la proposition de nouveau protocole exploitant la linéarité de la topologie physique du réseau, l'optimisation des placements des capteurs et du nombre de nœuds à déployer. Dans [37], les auteurs se sont fixé comme objectif dans leurs travaux de présenter une architecture basée sur LoRa pour surveiller la formation de poudre noire dans les gazoducs. Et pour cela, ils ont opté pour une topologie linéaire multi-sauts et ont proposé un nouveau protocole basé sur la synchronisation des nœuds avec un faible cycle d'utilisation. Suivant la même logique, les auteurs de cet article[38] ont développé un nouveau protocole MAC LoRa dénommé pm-LoRa. Ce protocole peut être utilisé pour la mise en place d'un réseau ad-hoc multi-sauts destinés à être utilisés dans des applications de surveillance et de contrôle où un déploiement linéaire des capteurs est requis. Prenant une voie différente des travaux cités précédemment, les auteurs dans [39] se sont penchés sur un nombre optimal de capteurs à déployer linéairement compte tenu de l'énergie initiale de chaque nœud de capteurs et des limites de mise en mémoire tampon des messages pour surveiller les oléoducs. Dans la topologie proposée les messages d'un nœud sont relayés par les nœuds adjacents jusqu'au puits qui est situé à l'extrémité de l'oléoduc à surveiller. Dans la même lignée, les auteurs de ce papier[40], travaille sur une stratégie de placement des capteurs avec la conception d'un protocole MAC afin de déterminer le nombre

minimum de capteurs. Le scénario de placement des capteurs est modélisé pour le réseau ferroviaire TER.

VII. Problématique

LoRa possède des caractéristiques militent son utilisation dans un déploiement de réseaux linéaires. Et souvent ces déploiements sont réalisés sur des kilomètres. L'architecture classique de LoRa définit une liaison filaire entre les passerelles et le serveur réseau. Alors si le déploiement s'étend sur une longue distance et que le serveur réseau et la passerelle ne sont pas sur le même site ce qui est souvent le cas, le coût du réseau câblé devient exorbitant. En plus il faut noter aussi l'absence de réseau câblé dans ces grandes zones généralement éloignée et dépeuplée.

Malgré les travaux intéressants sur l'optimisation des réseaux de capteurs linéaires pour la surveillance des oléoducs, des réseaux ferroviaires, etc. basé sur la technologie LoRa, présentés dans ci-dessus allant dans le sens d'apporter des solutions aux problèmes soulevés, des améliorations peuvent être apportées. En effet la plupart des protocoles conçus adoptent la topologie linéaire, ce qui peut complexifier les nœuds car ils doivent transmettre leurs messages mais aussi ceux des nœuds voisins. Et par ricochet, la consommation énergétique des nœuds devient plus importante. Certains travaux se limitent sur la liaison LoRa, c'est-à-dire entre les nœuds et la passerelle alors que la finalité est d'avoir une bonne efficacité et une bonne fiabilité du réseau de bout en bout. Le recours à la liaison filaire est aussi problématique car ces zones de surveillance ne sont pas souvent couvertes par les opérateurs de télécommunications mais aussi il est très coûteux du fait de l'immensité de l'environnement de déploiement.

VIII. Etat de l'art des simulateurs LoRa

La simulation d'un réseau est une étape importante dans la mise en place d'un réseau physique. Elle permet d'obtenir des mesures de performance du réseau sans implémentation réelle du système. Autrement dit, elle est un moyen d'évaluation du réseau à moindre coût. Il existe

quatre simulateurs de réseau LoRa[41] que nous allons voir dans cette section avant de les comparer.

1) Les simulateurs d'un réseau LoRa

a) FLoRa

FLoRa (Framework for LoRa) est un cadre de simulation de réseau LoRa, basé sur OMNeT++ (simulateur d'événements discrets) et des composants du Framework INET. Ce simulateur est open source et prend en compte aussi bien la couche physique de LoRa que la couche mac. L'un des atouts majeurs de FLoRa est la prise en charge du mécanisme d'adaptation du débit de données (ADR). La topologie du réseau peut être présentée en interface graphique comme dans la [Figure 18](#). Les caractéristiques de ce simulateur, écrit en C++, sont [42]:

- Modèle précis de la couche physique LoRa (y compris les collisions et l'effet de capture)
- Simulations avec une (ou plusieurs) passerelles dans le réseau
- Simulations de bout en bout, y compris une modélisation précise du réseau de backhails
- Statistiques de consommation d'énergie dans le réseau

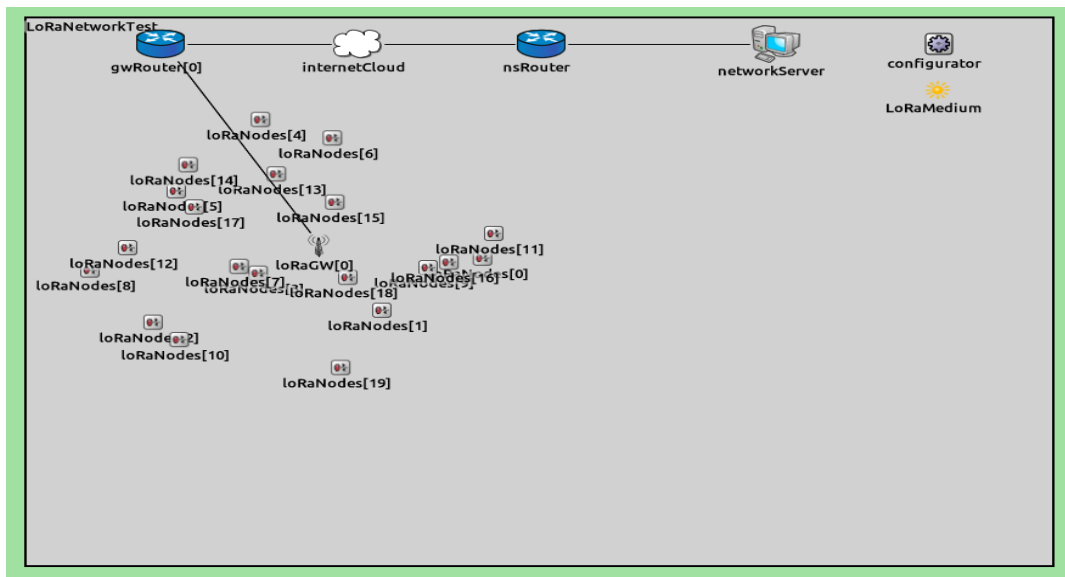


Figure 18 : Exemple d'une topologie réseau dans FLoRa

b) PhySimulator

PhySimulator est écrit en MATLAB. L'objectif de ce simulateur est de tester la réception de deux transmissions LoRa se chevauchant et interférant, modulées avec des facteurs d'étalement différents. Après chaque exécution du programme, 8 chiffres sont générés, montrant le taux d'erreur des paquets, des symboles et des bits et le taux d'erreur sur les bits. Plus précisément, la sortie est le taux d'erreur sur les paquets, les symboles et les bits pour chaque facteur d'étalement, interféré avec tout autre facteur d'étalement. Ce simulateur permet à l'utilisateur d'éditer divers paramètres (en changeant les valeurs des variables du code). Par exemple, vous pouvez changer la bande passante, la charge utile et le nombre maximum d'essais par étape, etc. Tous ces paramètres ne peuvent pas être modifiés via une interface graphique, mais l'utilisateur doit les modifier en changeant directement le code MATLAB. Ensuite, il est présenté un graphique montrant le taux d'erreur sur les bits et le SIR en utilisant le PhySimulator. Dans la [Figure 19](#), nous présentons un exemple de graphique utilisant le PhySimulator.

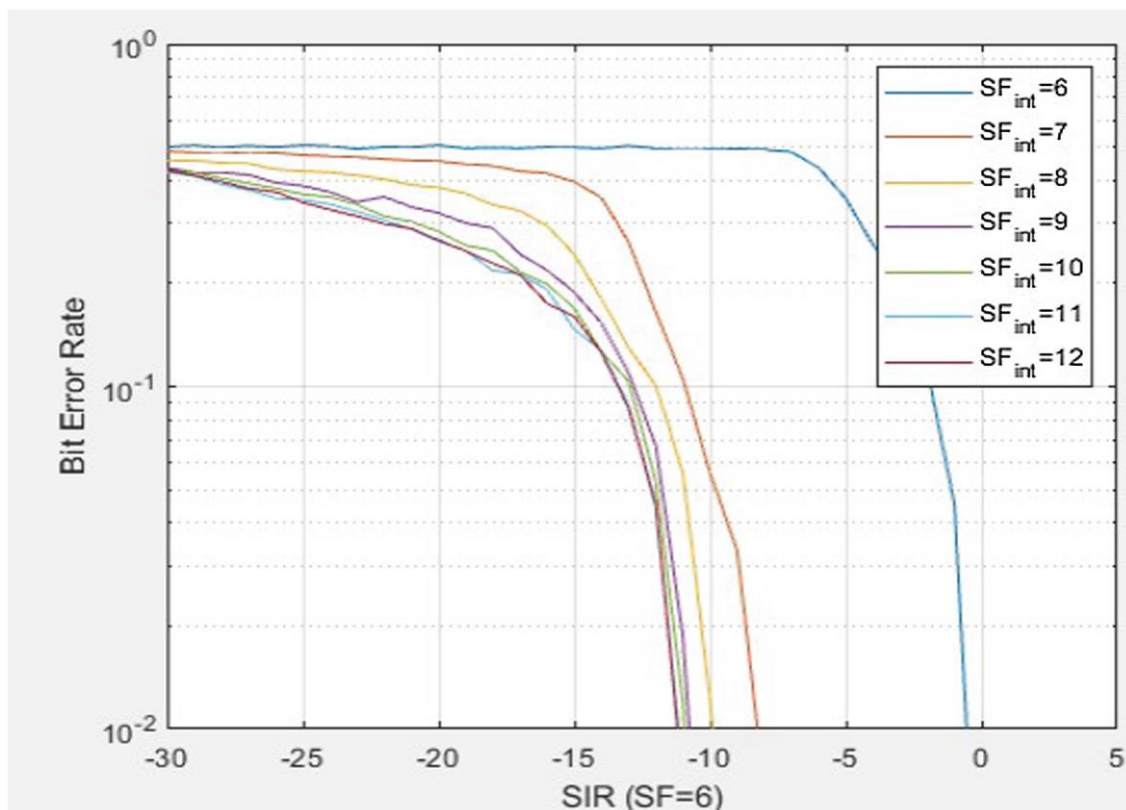


Figure 19 : Exemple de graphique avec PhySimulator[41]

c) Ns-3 module

Ns-3, un logiciel libre, est un simulateur réseau à évènement discret. Il est principalement destiné à l'enseignement et à la recherche. Ns-3 est développé en C++ et en python. Le simulateur LoRa, dont nous faisons référence dans cette partie, n'est pas un logiciel mais un module qui marche sous ns-3. Ce module est conforme à la classe A des spécifications LoRaWAN 1.0. La couche physique, la couche MAC et la couche application ont été créées, afin d'offrir une solution agile et hautement configurable. Cela donne la possibilité d'intégrer de nouveaux algorithmes côté serveur à ce module ns-3. De plus, le module proposé contient une classe supplémentaire afin de suivre la consommation d'énergie [41]. Les principales fonctionnalités du module sont :

- Prise en charge des appareils de classe A
- Implémentation du serveur réseau (ADR, messages confirmés, prise en charge multi-GW)
- Modèles de propagation urbaine
- Intégration du modèle énergétique

d) LoRaSim

LoRaSim est simulateur d'évènement discret qui permet l'évaluation de réseau LoRa à grande échelle. Ce simulateur est écrit en python. Certains paramètres sont configurables comme le nombre de nœud, le nombre de station de base entre autres. Pour évaluer, l'évolutivité et les performances du réseau LoRa, deux métriques sont utilisées : le taux d'extraction des données (en anglais data extraction rate DER) et la consommation énergétique du réseau. Un exemple de graphique avec un nœud puit et des nœuds LoRa réalisée avec LoRaSim est présenté dans la Figure 20.

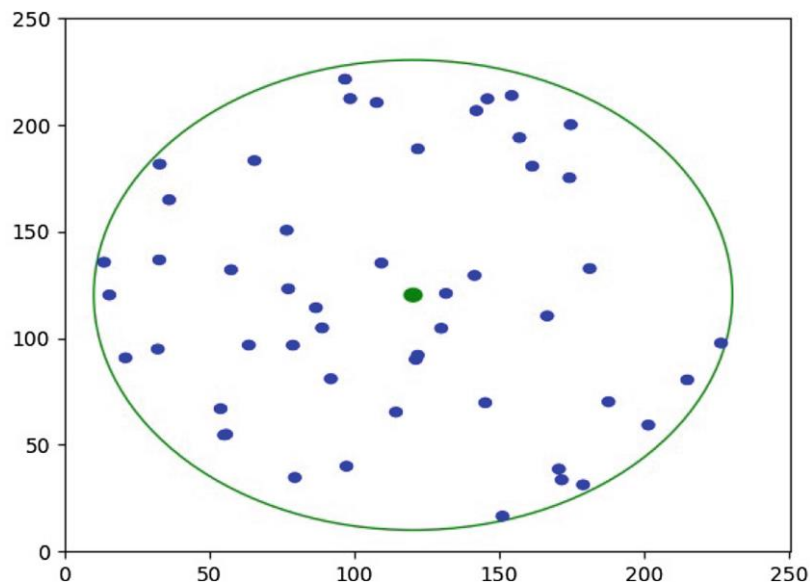


Figure 20 : Exemple de graphique avec LoRaSim

2) Comparaison des simulateurs LoRa

Après avoir passé en revue les simulateurs LoRa, nous avons opté pour FLoRa. Ce choix s'est appuyé sur des caractéristiques importantes pour effectuer une bonne simulation. Flora est open source à l'instar de PhySimulator et Ns-3 module. Il est facile de se familiariser avec FLoRa car il est basé sur OMNeT++ qui est très bien documenté en plus un papier et un site web lui est dédié. Ns-3 module et FLoRa sont les deux simulateurs qui prennent en compte la consommation énergétique des nœuds LoRa mais il y a moins de littérature sur ns-3 module que FLoRa. Une comparaison beaucoup plus élargie est proposée dans le [Tableau 7](#).

Features	PhySimulator	FLoRa	Ns-3 module	LoRaSim
Event	Discrete	Discrete	Discrete	Discrete
License type	Free	Open source (study and research)	Open source	Creative common attributes 4.0
Language	Matlab	C++	C++, python	python
Operating system	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Linux, MacOS, Windows through virtualization	Windows, Linux, MacOS
GUI	Only plots	Yes	Yes	Only plots
Energy consumption statistics	No	Yes	Yes	No
Documentation	Ok	Ok	Average	Ok
Number of published papers	2	1	1	2
Website	Yes	Yes	No	Yes
Community support	Good	Limited	Very good	Limited

Tableau 7 : Comparaison des simulateurs LoRa[41]

IX. Conclusion

Dans ce travail, nous avons passé en revue la technologie LoRa en abordant l'architecture d'un réseau LoRaWAN ensuite la couche physique LoRa et le protocole LoRaWAN. L'aspect qui rend la technologie LoRa idéal pour des applications de l'IDO est le mécanisme d'adaptation de débit de données (ADR). L'adoption de la technologie LoRa par de nombreuses sociétés offrant des solutions dans plusieurs domaines (villes intelligentes, maisons intelligentes, environnement intelligent, ...) démontre son efficacité par rapport à des solutions concurrentes.

Chapitre IV : Proposition d'une architecture LoRa sans fil linéaire

I. Introduction

LoRa est une technologie sans fil avec une portée de transmission pouvant atteindre des kilomètres. La modulation par étalement de spectre lui confère une forte robustesse contre les interférences et la consommation énergétique est très modérée dans un réseau LoRa. Cependant, ces caractéristiques décrites sont valables dans le cas du déploiement classique présenté dans la [Figure 9](#). Par conséquent, il est important de faire des études d'optimisation dans le cadre d'un déploiement linéaire.

Dans ce chapitre nous proposons une architecture de réseau LoRa sans fil. Par la suite, nous optimisons le déploiement des nœuds en nous basant sur des critères de performance tels que le taux de réception au niveau du serveur, la consommation énergétique et le SNIR.

II. Hypothèses et architecture proposée

Compte tenu de toutes ces insuffisances abordées en amont, nous proposons une architecture de réseau LoRa sans fil linéaire (voir [Figure 21](#)). L'architecture est composée de liaison courte portée (nœuds terminaux – passerelles) et liaison longue portée (passerelles – serveur réseau) qui remplace les liaisons filaires dans le cas du réseau classique.

1) Hypothèses

Ces travaux sont réalisés sous la base d'hypothèses qui répondent à certaines questions légitimes liées à l'architecture proposée.

Dans notre architecture, nous avons une liaison courte portée, entre les nœuds terminaux et les passerelles, obtenue en paramétrant des facteurs d'étalements faible (7 et 8) pour cette liaison

ce qui conduit à des débits les plus élevés possible avec LoRa et un faible temps de transmission. Tandis que pour la liaison entre les passerelles et le serveur réseau, nous utilisons des facteurs d'étalements élevés (9,10,11) pour avoir une transmission longue portée occasionnant des débits faibles et des temps de propagation plus grande. Ainsi, les passerelles peuvent être facilement inondé de paquet pouvant aboutir à des pertes de paquets ; pour pallier ces problèmes, nous considérons une grande capacité de la file d'attente au niveau des passerelles pour fluidifier la retransmission des paquets et limiter les pertes de paquets.

Puisque, dans l'architecture proposée, les nœuds terminaux et les passerelles sont placés linéairement sur de longues distances et qu'en général la longueur de la zone de déploiement est largement supérieure à la portée de transmission LoRa. Donc il devient inimaginable qu'un serveur réseau puisse desservir la zone. La solution serait d'utilisé une architecture multiserveur. Dans nos travaux, toutes les passerelles sont à portée de transmission du serveur réseau.

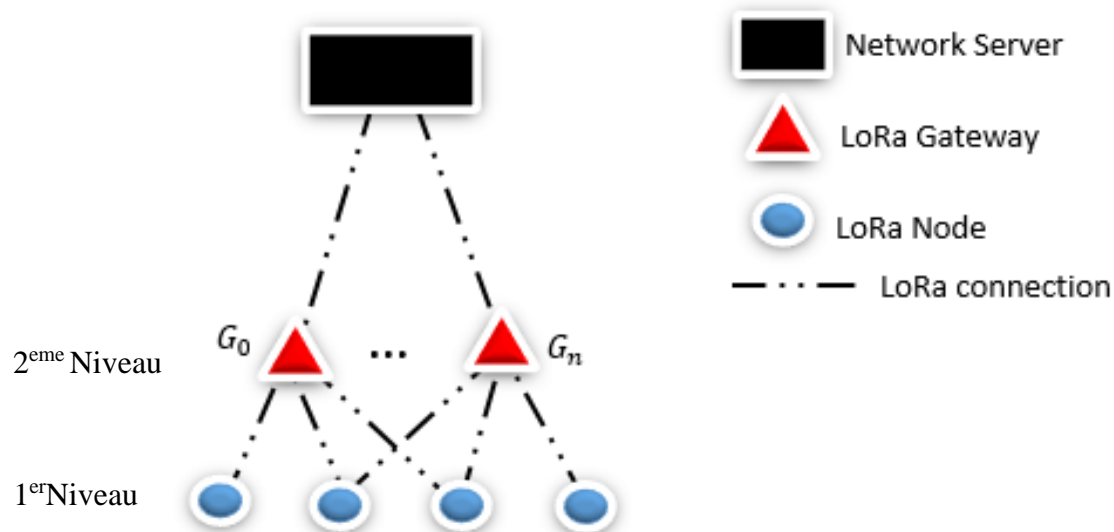


Figure 21 : Architecture réseau proposée

La topologie d'un réseau peut être vue sous deux angles, d'abord la représentation spatiale des nœuds du réseau (topologie physique) ensuite la circulation logique des données entre les nœuds du réseau (topologie logique).

2) Topologie physique

Nous avons opté dans ce mémoire pour un placement linéaire à deux niveaux. Ce choix permet de prendre en considération un large éventail d'application comme la surveillance des pipelines, la surveillance des infrastructures ferroviaires, la surveillance des routes, la surveillance des frontières, etc. Le déploiement des nœuds n'est pas aléatoire mais déterministe. En effet, un déploiement déterministe présente plusieurs avantages. Parmi lesquelles la connaissance exacte de l'emplacement des nœuds, étant donné que les coordonnées ont été prédéterminée, ce qui faciliterait la mise en route d'un nœud en cas de défaillance technique. Il permet aussi d'assurer une bonne couverture du réseau avec le nombre strict de nœuds qu'il en faut. A titre d'exemple, prenons un nœud capteur qui a pour fonction la détection de toute présence d'objets aux alentours de 200m du nœud, un déploiement déterministe placerait les nœuds avec une distance de 200m, alors qu'un déploiement aléatoire peut positionner plus d'un nœud dans une zone de 200m. En optimisant la couverture du réseau, nous améliorons par la même occasion le coût et réduisons les interférences entre les nœuds.

3) Topologie logique

Les nœuds de l'extrémité et le serveur d'application implémentent la logique de l'application. Les passerelles se comportent comme un pont transparent qui se charge de relayer les paquets LoRa. Le serveur réseau est le coordinateur du réseau. En général, le serveur d'application et le serveur réseaux résident dans le même dispositif physique. Dans la plupart de déploiement d'un réseau LoRa, il existe des liaisons sans fil (entre les nœuds terminaux et les passerelles) et filaire (entre les passerelles et le serveur réseau). Dans ce mémoire, nous travaillons avec une architecture dépourvue de liaison filaire de bout en bout. C'est-à-dire la liaison entre les passerelles et le serveur réseau est une liaison radio LoRa. Une architecture totalement sans fil

peut être déployée dans les environnements que nous avons ciblés dans ce mémoire à des fins de surveillance. Avec cette architecture, nous ne risquons pas des coupures de liaison liée à des évènements qui se déroulent dans la zone de déploiement comme par exemple des travaux de génie civil. En outre l'absence d'un réseau câblé dans ces grandes zones justifie l'architecture.

L'implémentation de cette architecture est réalisée à l'aide de FLoRa. Elle est décrite dans la section IV de ce chapitre

III. Implémentation de l'architecture sans fil de Bout en bout

FLoRa (Framework for LoRa) permet de simuler des réseaux LoRa de bout en bout. Il intègre tous les composants nécessaires pour mettre en place un réseau LoRa. Les nœuds terminaux (voir [Figure 22](#)) comportent un module d'application (simpleLoRaApp) qui génère la trame LoRa a envoyé et un autre module en l'occurrence LoRaNic se charge de la modulation et de la transmission vers les passerelles. La trame LoRa, reçu par la passerelle, est encapsulée en paquet IP par le module PacketForwader puis transmis au serveur réseau (voir [Figure 23](#)). L'implémentation du serveur réseau est réalisée à l'aide du Framework INET. La liaison entre la passerelle et le serveur est filaire (Ethernet) dans FLoRa, même s'il est possible qu'elle soit du sans fil, les développeurs de FLoRa n'ont pas fourni une passerelle offrant la possibilité d'une connexion sans fil avec le serveur réseau. Alors en se fiant à la passerelle dans FLoRa et des composants d'INET, nous avons mis en place une passerelle qui fonctionne avec du sans fil et qui communique aussi bien avec les nœuds terminaux qu'avec le serveur réseau. Cette nouvelle passerelle nous a permis de calibrer la portée de la transmission entre la passerelle et le serveur réseau. Ainsi nous pouvons évaluer notre déploiement avec une architecture sans liaison filaire des nœuds LoRa jusqu'au serveur réseau.

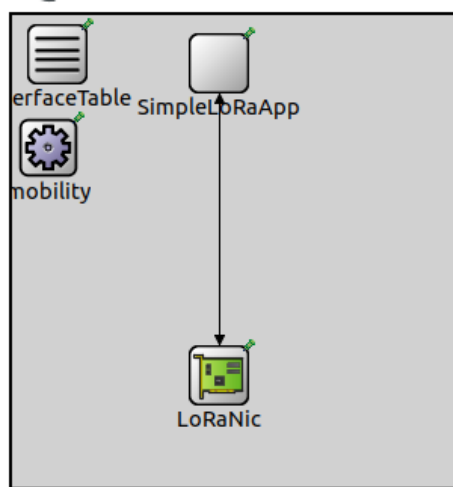


Figure 22 : Implémentation d'un nœud LoRa dans FLoRa

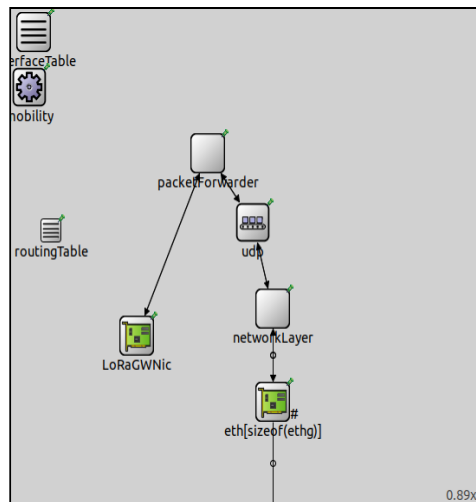
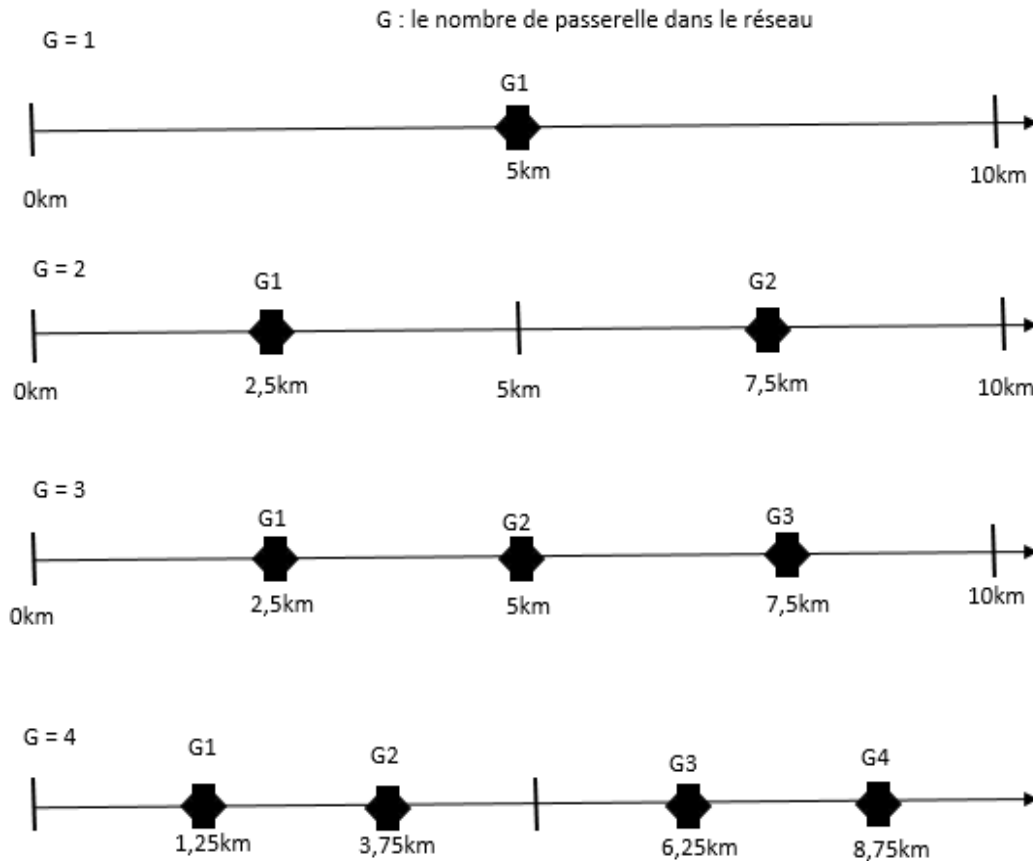


Figure 23 : Implémentation d'une passerelle LoRa dans FLoRa

IV. Configurations de simulation

Les nœuds LoRa de notre réseau simulé sont places sur un linéaire de dix kilomètres. La distance entre deux nœuds d'extrémités varie entre 100m à 500m par pas de 100m. Cette disposition permet de couvrir des nœuds dont la zone de détection ou d'activité s'étend de 100 à 500m. En général, l'intervalle des nœuds terminaux dans un réseau LoRa dépend des besoins et de l'application. Le nombre de passerelles est compris entre 1 à 7. Nous utilisons un nombre

de passerelle différent pour chaque simulation afin de voir l'impact du nombre de passerelle sur les performances du réseau et les passerelles sont réparties de façon uniforme sur les 10km (voir [Figure 24](#)).



[Figure 24](#) : Placement uniforme des passerelles dans le réseau

Le modèle LoRaLogNormalShadowing est une adaptation du modèle LogNormalShadowing présent dans INET à LoRa et est le modèle de propagation utilisé dans les simulations. Ce modèle indique une diminution de la puissance du signal de manière logarithmique en prenant en compte les obstacles que peut rencontrer le signal. L'équation du modèle LoRaLogNormalShadowing est la suivante :

$$PL_{dB} = PL_0 + 10\gamma \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Où PL_{dB} est la perte subie par le signal pendant la propagation, PL_0 représente l'affaiblissement du trajet sur une distance de référence d_0 qui peut être comprise entre 1 et 10 m pour les petites zones ou 1 km dans des zones plus étendues[43]. γ est l'exposant de l'affaiblissement sur le trajet avec une valeur comprise entre 2 et 6. d est la distance entre l'émetteur et le récepteur. X_σ est une variable aléatoire reflétant les bruits causant à l'affaiblissement du signal dû aux obstacles. La bande ISM de 868MHz est utilisée pour la simulation. En absence de législation au Sénégal règlementant l'utilisation de cette fréquence, des trames de données peuvent être envoyées en continues[44]. Les principaux paramètres de simulation sont consignés dans le Tableau 8.

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	500s
Période de chauffage	10s
Facteur d'étalement (SF)	7
Puissance de transmission (TP)	14dBm
Taux de codage (CR)	4
Bande passante	125 KHz
Modèle de propagation	LoRaLogNormalShadowing
d_0	1000m
γ	2.08
X_σ	3.57

Tableau 8: Principaux paramètres de simulation

La consommation énergétique des nœuds terminaux dépend du niveau de puissance d'émission. Dans FLoRA, les valeurs du courant instantané pour chaque niveau de puissance d'émission

sont tirées de [45]. Les courants consommés pendant les modes de réception et de sommeil sont dérivés de la fiche technique de Semtech SX1272/73 avec une tension d'alimentation de 3,3 V[46]. Pour limiter la consommation énergétique des nœuds terminaux, nous avons pris un facteur d'étalement égal à 7 et une puissance de transmission de 14 dBm au lieu des valeurs maximales de ces paramètres. En effet un facteur d'étalement élevé implique une augmentation du temps d'émission des nœuds extrémités. Pour les autres paramètres comme la bande passante, le taux de codage, nous avons choisi les valeurs standards. La Figure 25 présente la topologie physique du réseau réalisée avec FLoRa

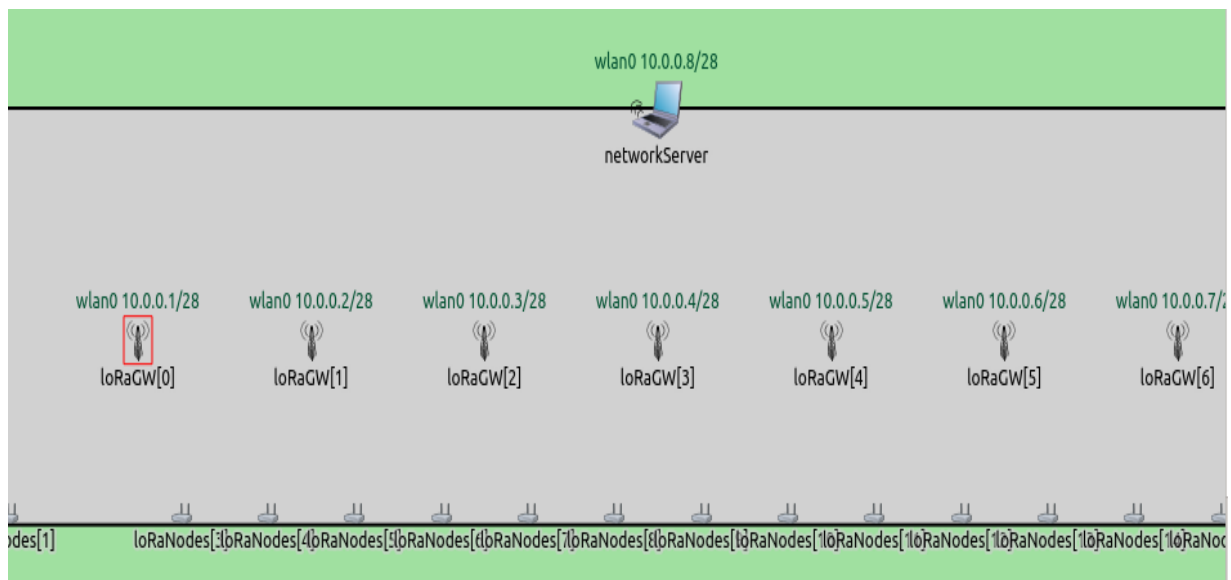


Figure 25 : Topologie physique du réseau simulé

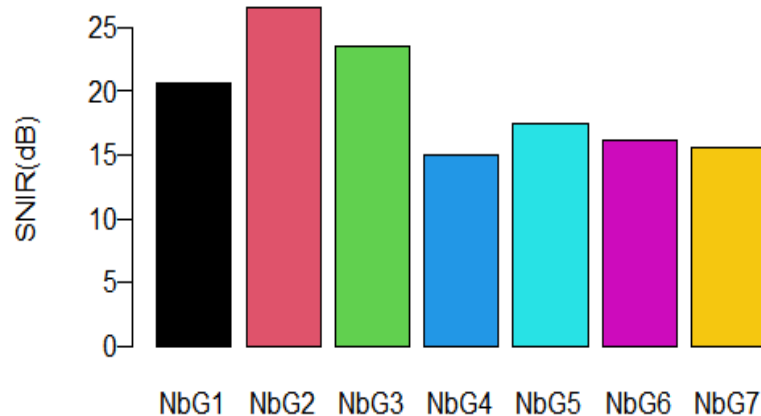
V. Analyses et discussion des résultats

Dans tout déploiement linéaire de réseau LoRa, il est primordial de viser les objectifs suivants : une bonne qualité de liaison entre les émetteurs et récepteur et une faible consommation énergétique des nœuds terminaux. Partant de ce constat, nous évaluons les performances de notre déploiement selon le SNIR (Signal-to-Noise-plus-Interférence Ratio), DER (Data Extraction rate), la consommation énergétique du réseau et le débit de paquet (throughput).

SNIR est la différence entre la puissance du signal utile et la somme de la puissance des signaux interférents et du bruit. Elle est résumée dans la formule suivante :

$$SNIR = P_u - (P_i + N)$$

Où P_u est la puissance du signal utile, P_i la somme des puissances des signaux interférant et N est le bruit de fond. Pour estimer la qualité de transmission entre les nœuds terminaux et les passerelles, nous avons pris le SNIR comme indicateur de performance. Dans la [Figure 26](#) nous présentons les résultats des mesures du SNIR moyenne dans les passerelles. Ces résultats sont obtenus par la division de la somme du SNIR moyenne à l'entrée des passerelles par le nombre de passerelle dans le réseau. Selon les travaux dans [47], un signal LoRa peut être démodulé par la passerelle si son SNIR est supérieur à 6 dB. Les valeurs moyennes des SNIR montrent qu'elles sont largement supérieures au SNIR seuil, ce qui traduit une bonne qualité de transmission entre les nœuds et les passerelles dans le réseau.



[Figure 26](#) : Le SNIR moyenne pour les passerelles du réseau

Outre le SNIR, nous évaluons la performance du réseau par le DER qui est le rapport entre le nombre de paquets total reçu par le serveur réseau (P_r) sur le nombre paquet total émis par les nœuds terminaux (P_e) (voir formule ci-dessous). Les paquets ont une taille de 8 octets.

$$DER = \frac{P_r}{P_e}$$

La [Figure 27](#) présente le taux de réception (DER) au niveau du serveur réseau pour différents nombres de passerelle LoRa en fonction de la distance entre deux nœuds terminaux. Les plus faibles taux de réceptions sont obtenus avec plus de nœuds terminaux sur les 10km c'est-à-dire la plus faible distance(100m) entre deux nœuds. Les résultats montrent qu'à partir de quatre passerelles tous les scénarios de déploiements des nœuds terminaux permettent d'avoir un taux de réception de plus 90% au niveau du serveur. Nous ne visons pas à atteindre les 100% de taux de réceptions car pour y parvenir nous devons augmenter la puissance de transmission des nœuds terminaux ce qui entraînerait une hausse de la consommation énergétique des nœuds terminaux. Au-delà des 4 passerelles, la variation du taux de réception devient insignifiante. En somme plus le nombre de nœud augmente dans le réseau, plus le taux de réceptions devient faible mais aussi une augmentation du nombre de passerelle signifie une augmentation du DER

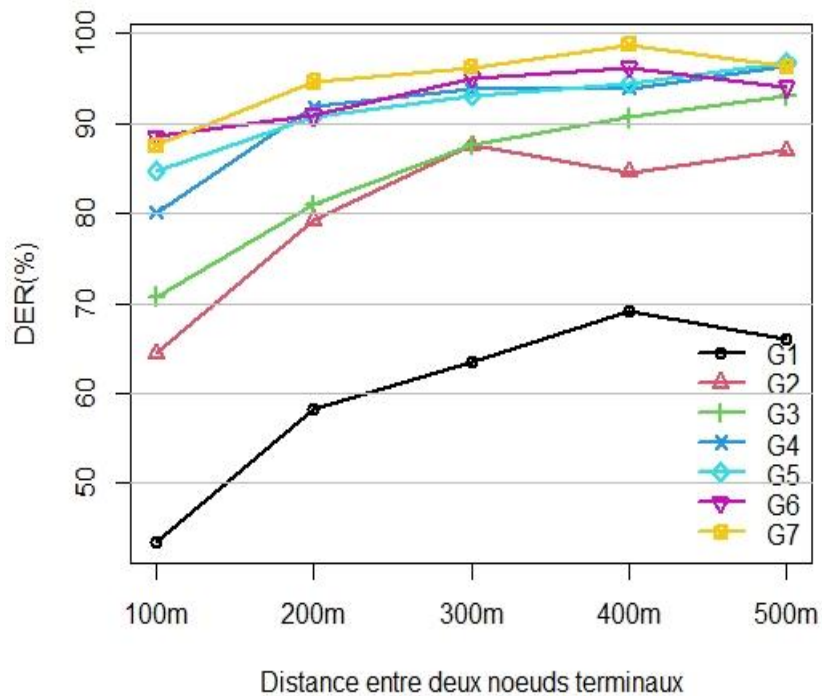


Figure 27 : Le DER selon le nombre de passerelle en fonction de la distance entre les nœuds terminaux

Pour aller plus loin, nous scrutons le débit de paquet qui est le nombre de paquets de données reçus avec succès par le serveur réseau par unité de temps. Les résultats sont consignés dans la Figure 28. Ils montrent qu'à compter de quatre passerelles dans le réseau, le nombre de paquets reçu par unité de temps par le serveur réseau devient quasiment constant. Ces résultats consolident les résultats précédents concernant le DER qui consistait qu'à partir de quatre passerelles la variation du taux de réceptions au niveau du serveur réseau devient insignifiante.

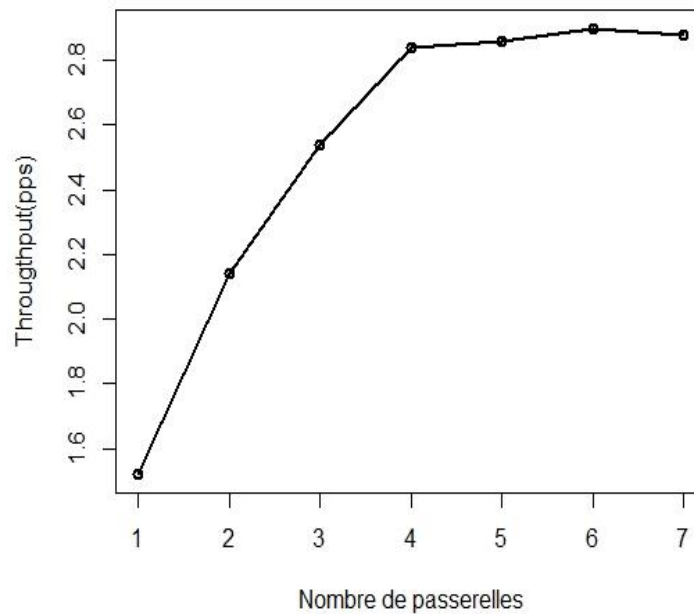


Figure 28 : Le débit de paquet en fonction du nombre de passerelle dans le réseau

La consommation énergétique des nœuds est un aspect important dans les déploiements linéaires. Elle est obtenue en faisant le rapport entre l'énergie totale consommée par les nœuds(E) et le nombre de paquets total reçu avec succès par le serveur réseau (P_r) (voir la formule suivante).

$$NEC = \frac{E}{P_r}$$

Les résultats de la consommation énergétique du réseau sont consignés dans la Figure 29. La consommation énergétique est plus élevée avec une seule passerelle dans le réseau. Plus le déploiement est dense, plus la NEC est importante. Et à compter de quatre passerelles dans le réseau la variation de la NEC est faible. Cette situation s'explique par le fait avec moins de passerelle dans le réseau non seulement les paquets reçus avec succès dans le serveur réseau diminues mais aussi les nœuds sont obligés d'effectuer beaucoup de retransmission de paquet ce qui entraine une consommation davantage d'énergie des nœuds

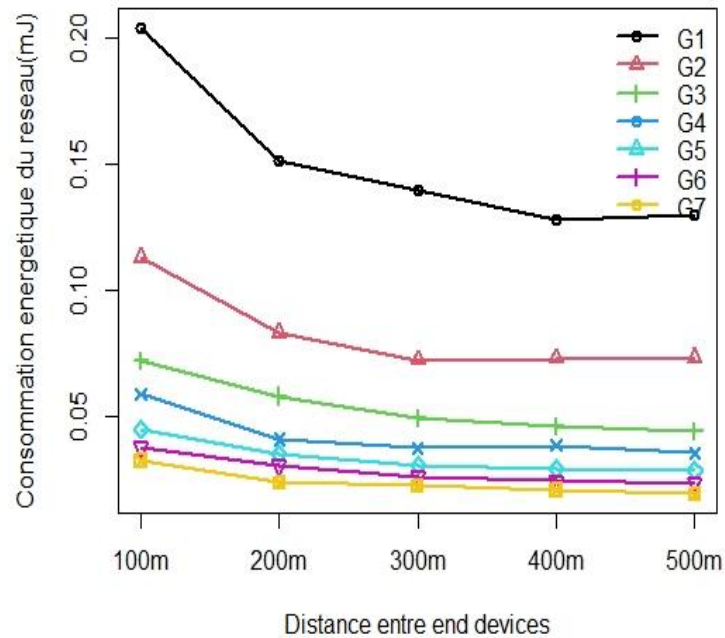


Figure 29 : Le NEC selon le nombre de passerelle en fonction de la distance entre les nœuds terminaux

VI. Synthèses

L'objectif de cette étude est de définir un modèle de déploiement optimal pouvant être répliqué sur une longue distance ou à grande échelle. En effet, pour un schéma de 10 kilomètres les simulations ont montré que le nombre de passerelles qui permet d'optimiser les performances telles que l'énergie, le débit ou le SNIR est égal à 4. Au-delà de 4, les performances varient très légèrement. L'étude faite dans ce mémoire se concentre davantage sur le nombre de nœuds de passerelle à déployer sur une distance de 10 kilomètres. Par contre, Le nombre de nœuds de terminaux n'est pas défini car il dépend des besoins de l'application. Cependant, l'étude définit une distance minimale entre eux. Ainsi, pour une distance minimale de 200m par nœud de dispositif d'extrémité, les performances souhaitées sont obtenues. Afin de minimiser le

déploiement des nœuds terminaux, il est cependant préférable d'opter pour le modèle avec une distance minimale entre les dispositifs d'extrémité de 500m.

VII. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons proposé une architecture de réseau de capteurs LoRa linéaires différente de l'architecture classique déployée sur une distance de 10Km. Le réseau est dépourvu de liaison filaire de bout en bout. Il est implémenté grâce à FLoRa . La performance de notre déploiement est jugée à l'aide du taux de réception au niveau du serveur, le SNIR au niveau des passerelles et la consommation énergétique des nœuds. Les résultats permettent de tirer la conclusion que sur une distance de 10km le déploiement minimum de 4 passerelles et une distance minimum de 200m entre les nœuds terminaux permettent d'avoir une bonne performance du réseau.

CONCLUSIONS ET PRESPECTIVES

Aujourd'hui, l'internet des objets est devenu omniprésent dans la vie quotidienne. Les services rendus par les objets connectés sont divers. Après une comparaison des technologies LPWAN les plus plébiscitées (LoRa, SigFox, NB-IoT), dans ce mémoire, nous avons opté à l'utilisation de la technologie LoRa à des fins de surveillance, de détection, etc. dans des infrastructures ou environnements dans lesquels un déploiement linéaire des nœuds est le plus adapté. Nous nous sommes intéressés sur l'optimisation du déploiement en proposant une architecture sans fil de bout en bout du réseau mais aussi en travaillant sur le nombre minimum de passerelles à déployer dans le réseau. Etant donné que les environnements ciblés sont parfois sujets à des travaux de toute nature à titre d'exemple des travaux de génie civil avec l'architecture proposée, nous ne risquons pas de coupure de liaison filaire. En outre, l'absence d'un réseau câblé dans ces grandes zones justifie l'architecture proposée. Et connaître le nombre de passerelles minimum à déployer dans le réseau permet de réduire le coût du déploiement. Le réseau est implémenté à l'aide de FLoRa basé sur le simulateur réseaux OMNeT ++. Le taux de réception des paquets au niveau du serveur réseau, SNIR et la consommation énergétique des nœuds terminaux sont les indicateurs de performance utilisés pour optimiser le déploiement. Les résultats montrent que sur une distance de 10 km le déploiement minimum de 4 passerelles avec une distance d'au moins 200 m entre les nœuds terminaux donnent une bonne efficacité et assurent la fiabilité du réseau.

Ce mémoire nous a permis de se pencher sur des possibles pistes de réflexions. En effet, nous nous sommes intéressés à l'optimisation d'un déploiement linéaire des nœuds d'un même réseau, alors avec l'essor fulgurant des objets connectés, il peut arriver que deux ou plusieurs réseaux LoRa soient déployés côte à côte. Donc nos travaux futurs pourront analyser l'impact des réseaux LoRa sur un réseau LoRa particulier. Puisque nous avons choisi un déploiement linéaire alors nos recherches pourront s'orienter aussi vers un développement d'un protocole MAC basé sur un jeton pour une topologie de réseau LoRa linéaire tirant profil de la linéarité du déploiement des nœuds du réseau.

Annexe : OMNet++ et INET.

FLoRa (Framework for LoRa) est un Framework de simulation permettant de réaliser des simulations de bout en bout pour les réseaux LoRa. Il est basé sur le simulateur de réseau OMNeT++ et utilise également des composants du Framework INET.

I. Présentation et installation de OMNeT ++

1) Présentation

a) Notion de module[48]

Un modèle OMNeT++ est constitué de modules hiérarchiquement imbriqués qui communiquent entre eux en se transmettant des messages. Le module de haut niveau est appelé le module système, il contient des sous-modules qui peuvent également contenir à leur tour d'autres sous-modules. La profondeur de l'imbrication des modules est illimitée, ce qui permet à l'utilisateur de reproduire la structure logique du système réel dans la structure modèle. Les modules actifs sont appelés modules simples et sont rédigés en C++ utilisant la bibliothèque de classes de simulation. Les modules simples peuvent être regroupés en modules composés. L'ensemble du modèle, appelé réseau, est lui-même un module composé

Les modules simples et composés sont des exemples de types de modules. En décrivant le modèle, l'utilisateur définit les types de modules ; des exemples de ces types de modules servent de composants pour d'autres les types de modules complexes. Enfin, l'utilisateur crée le module du système comme une instance d'un type de module préalablement défini ; tous les modules du réseau sont instanciés en tant que sous-modules et sous-sous-modules du système module. Les types de modules peuvent être stockés dans des fichiers distincts du lieu d'utilisation permettant de regrouper les types de modules existants pour créer des bibliothèques de composants.

Les modules communiquent en échangeant des messages. Le temps de simulation local d'un module avance lorsque le module reçoit un message - le message peut provenir d'un autre module ou à partir du même module (les auto-messages sont utilisés pour les minuteries). Les portes sont les interfaces d'entrée et de sortie des modules ; les messages sont envoyés par les portes de sortie et arrivent par les portes d'entrée. Chaque connexion est créée dans un seul niveau du module hiérarchie. En raison de la structure hiérarchique du modèle, les messages se déplacent généralement par une série de correspondances, en commençant et en arrivant en modules simples

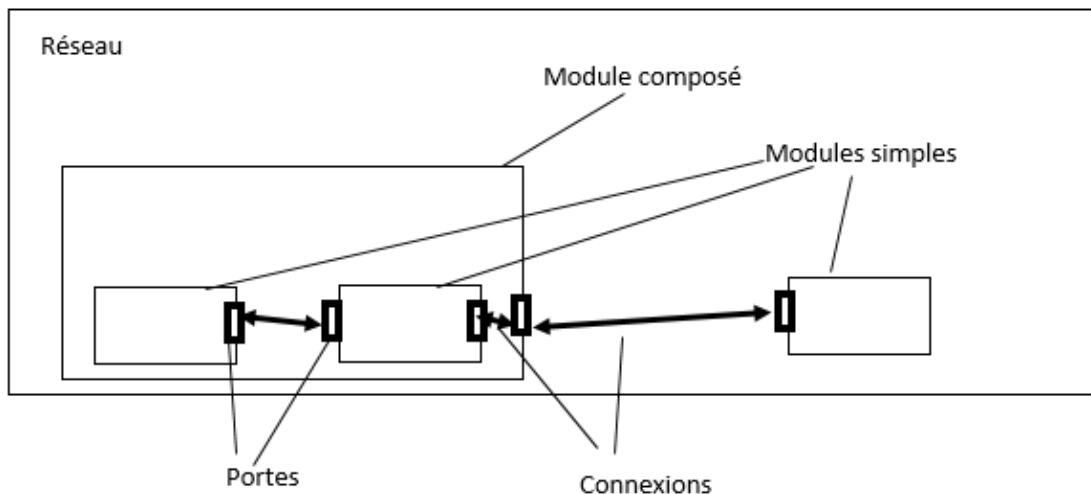


Figure 30 : Modèle d'un réseau dans OMNeT++

b) Les différents fichiers dans OMNeT++

Il existe principalement quatre types de fichier dans OMNeT ++. Chaque fichier remplit un rôle bien défini dans le réseau. Ces fichiers sont les suivants :

- Les fichier C++ : Ces types de fichier contiennent l'implémentation des modules. Chaque module correspond à un fichier en .cc et un fichier en .h, il décrit le comportement des modules.

- Les fichier NED : NED est l'abréviation de Network Description, ils permettent de décrire les modules du réseau et les connexions entre eux en utilisant le langage NED. Un exemple du fichier NED est présenté dans la [Figure 31](#)

```
38 //
39 network LoRaWireless
40 {
41     parameters:
42         int numberOfGateways = default(1);
43         int numberOfNodes = default(1);
44         int networkSizeX = default(5000);
45         int networkSizeY = default(5000);
46         int numRadios @display("bgb=672,460") = default(1);
47     submodules:
48         LoRaNodes[numberOfNodes]: LoRaNode {
49             @display("p=83.664,233.856");
50         }
51         LoRaGW[numberOfGateways]: LoRaGWireless {
52             @display("p=346,216;is=s");
53         }
54         LoRaMedium: LoRaMedium {
55             @display("p=35,162");
56         }
57         configurator: IPv4NetworkConfigurator {
58             parameters:
59                 //assignDisjunctSubnetAddresses = false;
60                 @display("p=36,118");
61         }
62         idealRadioMedium: IdealRadioMedium {
63             parameters:
64                 @display("p=35,16");
65         }
66         visualizer: IntegratedCanvasVisualizer {
67             @display("p=36,68");
68         }
69     }
```

Figure 31 : Exemple de fichier NED

- Les fichiers .ini : Ce sont les fichiers d'initialisation de la simulation d'un réseau. Ils sont liés aux fichier NED et permet d'initialiser les paramètres de simulation. La [Figure 32](#) présente un exemple d'un fichier .ini.


```
[General]
network = sansfil
record-eventlog = true
eventlog-file = /media/mrdeve/B6126F8E126F5283/Users/HP/Desktop/event/${configname}-${runnumber}.elog
#eventlog-recording-intervals = 10..20
**.networkServer.**.module-eventlog-recording = true
**.LoRaNodes[*]**.module-eventlog-recording = true
**.LoRaGW[*]**.module-eventlog-recording = true
**.module-eventlog-recording = false
#rng-class = "cMersenneTwister"
#**.cmdenv-log-level = trace
#cmdenv-redirect-output = true

**.throughput.result-recording-modes = mean
# network features
**.LoRaGW[*].numUdpApps = 1
**.LoRaGW[*].packetForwarder.localPort = 2000
**.LoRaGW[*].packetForwarder.destPort = 1000
**.LoRaGW[*].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.LoRaGW[*].packetForwarder.indexNumber = 0

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "LoRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = ${"avg"}
```

Figure 32 : Exemple de fichier NED

- Les fichiers .msg : Les .msg contiennent la description des messages échangés entre les modules.

2) Installation

OMNeT ++ est un logiciel de simulation multiplateforme et dans ce mémoire nous avons travaillé sur le système d'exploitation Linux (Ubuntu). Donc nous allons vous présenter le support d'installation d'OMNeT++ dans Linux puisé de <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/InstallGuide.pdf>.

Tout d'abord, il faut télécharger OMNeT ++ à cette adresse <http://omnetpp.org/> et décompresser le fichier avec la commande suivante (à saisir dans un terminal) dans un répertoire de votre choix:

```
$ tar xvfz omnetpp-5.6.1-src.tgz
```

Maintenant, il faut se déplacer dans le répertoire où est extraire l'archive d' OMNeT ++ et saisissez cette commande qui permet de configurer le logiciel :

```
$ ./configure
```

Après configuration la commande suivante permet de compiler le programme.

```
$ make
```

Pour démarrer le simulateur, on tape la commande suivante :

```
$ omnetpp
```

Présentation de INET[48]

INET est construit autour du concept de modules qui communiquent par passage de messages. Les agents et les protocoles réseau sont représentés par des composants, qui peuvent être librement combinés pour former des hôtes, des routeurs, des commutateurs et d'autres périphériques réseau. De nouveaux composants peuvent être programmés par l'utilisateur, et les composants existants ont été écrits de manière à être faciles à comprendre et à modifier. INET bénéficie de l'infrastructure fournie par OMNeT ++. Au-delà de l'utilisation des services fournis par le noyau et la bibliothèque de simulation OMNeT ++ (modèle de composant, paramétrage, enregistrement des résultats, etc.), cela signifie également que les modèles peuvent être développés, assemblés, paramétrés, exécutés et leurs résultats évalués dans le confort de l'IDE de simulation OMNeT ++ ou depuis la ligne de commande. L'application INET possède certaines fonctionnalités :

- Couches OSI implémentées (physique, couche liaison, réseau, transport, application)
- Implémentations de protocoles enfichables pour différentes couches
- Pile réseau IPv4 / IPv6 (ou créez votre propre couche réseau)
- Protocoles de couche de transport : TCP, UDP, SCTP
- Protocoles de routage (ad hoc et câblés)

- Interfaces filaires / sans fil (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, etc.)
- Couche physique avec un niveau de détail évolutif (radio de disque d'unité vers des modèles de propagation détaillés, représentation du niveau de la trame au niveau du bit / symbole, etc.)
- Large gamme de modèles d'application > Prise en charge de l'émulation de réseau
- Aide à la mobilité
- Prend en charge la modélisation de l'environnement physique (obstacles à la propagation radio, etc.)

L'assemblage d'une simulation INET commence par la définition d'un module représentant le réseau. Les réseaux sont des modules composés qui contiennent des nœuds de réseau, des configurateurs automatiques de réseau, et parfois en plus le support de transmission, l'environnement physique, divers visualiseurs et d'autres modules liés à l'infrastructure. Les réseaux contiennent également des connexions entre les nœuds de réseau représentant des câbles. Les grands réseaux hiérarchiques peuvent être organisés en modules composés pour exprimer directement la hiérarchie. Il n'y a pas de réseaux prédéfinis dans INET, car il est très facile d'en créer un, et en raison des vastes possibilités. Cependant, l'IDE OMNeT++ fournit plusieurs assistants de génération de topologie pour les scénarios avancés. Comme INET est un cadre basé sur OMNeT++, les utilisateurs utilisent principalement NED pour décrire la topologie du modèle, et les fichiers INI pour fournir la configuration.

Bibliographie

- [1] « IoT : nombre d'appareils connectés dans le monde 2015-2025 », *Statista*. <https://fr.statista.com/statistiques/584481/internet-des-objets-nombre-d-appareils-connectes-dans-le-monde--2020/> .
- [2] P. Sethi et S. R. Sarangi, « Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications », *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2017, p. e9324035, janv. 2017, doi: 10.1155/2017/9324035.
- [3] Futura, « Internet », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-internet-3983/>.
- [4] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, et I. Chlamtac, « Internet of things: Vision, applications and research challenges », *Ad Hoc Netw.*, vol. 10, n° 7, p. 1497-1516, 2012.
- [5] Imad Saleh, « Internet des Objets (IdO) : Concepts, Enjeux, Défis et Perspectives », <https://www.openscience.fr>, 26 février 2018. <https://www.openscience.fr/Internet-des-Objets-IdO-Concepts-Enjeux-Defis-et-Perspectives>.
- [6] J.-P. Hauet, « Internet des objets-Part 2-Les protocoles », *Rev. Electr. Electron.*, vol. Revue de l'Electricité et de l'Electronique, p. 130-142, déc. 2016.
- [7] H.-J. Lu et Y. Yu, « Research on WiFi Penetration Testing with Kali Linux », *Complexity*, vol. 2021, p. e5570001, févr. 2021, doi: 10.1155/2021/5570001.
- [8] K. Kim *et al.*, « What's your protocol: Vulnerabilities and security threats related to Z-Wave protocol », *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 66, p. 101211, juill. 2020, doi: 10.1016/j.pmcj.2020.101211.
- [9] H. Fred et S. John, « Fitting the Problem to the Paradigm: Algorithm Characteristics Required for Effective Use of MapReduce », doi: 10.1016/j.procs.2012.09.091.
- [10] « Zigbee », *Connectivity Standards Alliance*. <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/> .
- [11] « Qu'est que le Bluetooth Low Energy ? », *ELA Innovation*, 22 décembre 2020. <https://elainnovation.com/quest-que-le-bluetooth-low-energy/>.
- [12] E. G. | K. 18a | D.-82041 Oberhaching, « White Papers », *EnOcean*. <https://www.enocean.com/en/technology/white-papers/>.
- [13] Maxime Mroue, « Développement de réseaux radio d'objets connectés pour les Villes Intelligentes : amélioration de la Qualité de Service du réseau LoRa », Université Nantes, 2019.

- [14] B. Benhamou, « L'internet des objets: Défis technologiques, économiques et politiques », *Esprit 1940-*, p. 137-150, 2009.
- [15] « ISO/IEC 30141:2018(en), Internet of Things (IoT) — Reference Architecture ». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:30141:ed-1:v1:en> .
- [16] « Who We Are », *Connectivity Standards Alliance*. <https://zigbeealliance.org/about/>.
- [17] « IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity. » <https://www.ieee.org/> .
- [18] « À propos du 3GPP ». <https://www.3gpp.org/about-3gpp>.
- [19] U. Raza, P. Kulkarni, et M. Sooriyabandara, « Low Power Wide Area Networks: An Overview », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, n° 2, p. 855-873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [20] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, et F. Meyer, « A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment », *ICT Express*, vol. 5, n° 1, p. 1-7, mars 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [21] « Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT) ». <https://www.sigfox.com/en> .
- [22] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, et F. Meyer, « Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT », in *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2018, p. 197-202.
- [23] A. Lavric, A. I. Petrariu, et V. Popa, « Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions », *IEEE Access*, vol. 7, p. 35816-35825, 2019.
- [24] R. S. Sinha, Y. Wei, et S.-H. Hwang, « A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT », *ICT Express*, vol. 3, n° 1, p. 14-21, mars 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [25] « USECASE_SEMTECH_SMARTCITIES_BOOK.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: https://info.semtech.com/hubfs/Smart%20Cities%20Ebook/USECASE_SEMTECH_SMARTCITIES_BOOK.pdf?hsLang=en-us
- [26] « Semtech-UseCaseEBook-SmartAg-2021-web.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://info.semtech.com/hubfs/Semtech-UseCaseEBook-SmartAg-2021-web.pdf?hsLang=en-us>
- [27] « lorawan_regional_parameters_v1.0.3reva_0.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.3reva_0.pdf

- [28] « Fig. 2. A linear frequency modulated upchirp in the time domain », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/A-linear-frequency-modulated-upchirp-in-the-time-domain_fig2_331640028 .
- [29] R. Kufakunesu, G. P. Hancke, et A. M. Abu-Mahfouz, « A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges », *Sensors*, vol. 20, n° 18, Art. n° 18, janv. 2020, doi: 10.3390/s20185044.
- [30] « LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- [31] « 10864-caracterisation-interface-radio-lor-vf.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10864/10864-caracterisation-interface-radio-lor-vf.pdf>
- [32] C. E. Fehri, M. Kassab, S. Abdellatif, P. Berthou, et A. Belghith, « LoRa technology MAC layer operations and Research issues », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 130, p. 1096-1101, janv. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.162.
- [33] M. A. Ertürk, M. A. Aydın, M. T. Büyükakkaşlar, et H. Evirgen, « A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies », *Future Internet*, vol. 11, n° 10, p. 216, oct. 2019, doi: 10.3390/fi11100216.
- [34] « LoRaWAN® 1.0.4 Specification Package », *LoRa Alliance®*. https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/.
- [35] M. Słabicki, G. Premsankar, et M. D. Francesco, « Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments », *NOMS 2018 - 2018 IEEE IFIP Netw. Oper. Manag. Symp.*, 2018, doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255.
- [36] I. Jawhar, N. Mohamed, et D. P. Agrawal, « Linear wireless sensor networks: Classification and applications », *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 34, n° 5, p. 1671-1682, sept. 2011, doi: 10.1016/j.jnca.2011.05.006.
- [37] A. Abrardo, A. Fort, E. Landi, M. Mugnaini, E. Panzardi, et A. Pozzebon, « Black powder flow monitoring in pipelines by means of multi-hop LoRa networks », in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)*, 2019, p. 312-316.
- [38] M. D. Loc et M. K. Kim, « Multi-Hop LoRa Network with Pipelined Transmission Capability ».
- [39] O. E. Elnaggar, R. A. Ramadan, et M. B. Fayek, « WSN in monitoring oil pipelines using ACO and GA », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, p. 1198-1205, 2015.

- [40] P. S. Kebbeh, M. Jain, et B. Gueye, « SenseNet: IoT temperature measurement in railway networks for intelligent transport », in *2020 IEEE International Conf on Natural and Engineering Sciences for Sahel's Sustainable Development-Impact of Big Data Application on Society and Environment (IBASE-BF)*, 2020, p. 1-8.
- [41] Christos Bouras, Apostolos Gkamas, Spyridon Aniceto Katsampiris Salgado, et Vasileios Kokkinos, « Comparison of LoRa Simulation Environments ». [En ligne]. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33506-9_33
- [42] « Accueil | FLoRa - Un cadre pour les simulations LoRa ». <https://flora.aalto.fi/> .
- [43] D. Ousmane, P. Congduc, et T. Ousmane, « Comparing and Adapting Propagation Models for LoRa Networks », *IEEE Conf. Proc.*, vol. 2020, n° WiMob, p. 1-7, 2020.
- [44] M. R. Seye, B. Gueye, et M. Diallo, « An evaluation of LoRa coverage in Dakar Peninsula », in *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, oct. 2017, p. 478-482. doi: 10.1109/IEMCON.2017.8117211.
- [45] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, et J. M. Alonso, « Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? », in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, New York, NY, USA, nov. 2016, p. 59-67. doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [46] M. Slabicki, G. Premsankar, et M. Di Francesco, « Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments », in *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Taipei, Taiwan, avr. 2018, p. 1-9. doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255.
- [47] A. Waret, M. Kaneko, A. Guitton, et N. E. Rachkidy, « LoRa Throughput Analysis with Imperfect Spreading Factor Orthogonality », *ArXiv180306534 Cs*, mars 2018, [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1803.06534>
- [48] V. H. Daniel, « CONTRIBUTION A L'EVALUATION D'UNE APPLICATION IOT IMPLIQUANT DES CAPTEURS WBAN SOUS FRAMEWORK OMNET++ ». [En ligne]. Disponible sur: http://pmb-int.univ-temouchent.edu.dz/opac_css/doc_num.php?explnum_id=3301