

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

-- تلمسان -- جامعة أبي بكر بلقايد
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par Ghouti HOUALIA

Sujet

Optimisation des réseaux LoRaWAN pour la couverture urbaine dense

Soutenu publiquement, le 24/06/2026, devant le jury composé de :

F.T BENDIMERAD	Professeur Emirite	Université de Tlemcen	Président
A. SDJELMACI	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
F. DERRAZ	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant
M. BOUSAHLA	MCB	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année universitaire : 2025-2026

Dédicace

À mes chers parents,
qui ont consacré leur vie à mon éducation,
dont le soutien indéfectible et l'amour inconditionnel
ont été ma lumière dans les moments les plus sombres.
À mes frères et sœurs,
Pour leur complicité, leurs encouragements constants
et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours.
À mes amis et compagnons d'études,
avec qui j'ai partagé les joies et les difficultés
de ces années universitaires inoubliables.
À tous ceux qui ont cru en moi
et qui m'ont encouragé à poursuivre mes rêves,
même lorsque la route semblait longue et semée d'embûches.
Je vous dédie ce modeste travail
en témoignage de mon amour, ma gratitude et mon profond respect.
Remerciements

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout d'abord Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mon encadreur, Monsieur DERRAZ Foued, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour sa disponibilité permanente, ses précieux conseils scientifiques, sa rigueur méthodologique et son accompagnement bienveillant tout au long de ce projet. Sa confiance en mes capacités a été une source de motivation inestimable.

Je remercie également Monsieur BOUSAHLA Miloud, Maître de Conférences, co-encadreur de ce mémoire, pour ses orientations judicieuses, ses remarques constructives et le temps qu'il m'a accordé malgré ses nombreuses responsabilités.

Je suis honoré et reconnaissant envers Monsieur F.T BENDIMERAD, Professeur Emirate à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance. Sa réputation scientifique et son expertise constituent pour moi une grande distinction.

Je tiens également à remercier Mme A. SEDJELMACI. qui a accepté d'évaluer ce travail. Sa lecture attentive et ses questions lors de la soutenance ont contribué à enrichir ce mémoire.

Ma reconnaissance va aussi à l'ensemble du corps enseignant de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, qui nous a transmis un savoir précieux durant toutes ces années d'apprentissage.

Je remercie enfin ma famille — mes parents, mes frères et mes sœurs — pour leur patience inébranlable, leur soutien moral et matériel, et pour tous les sacrifices consentis. Ce travail est le fruit de leur amour et de leur dévouement.

À tous mes amis et camarades de promotion qui m'ont soutenu et avec qui j'ai partagé des moments précieux, je dis un grand merci.

HAOULIA Ghouti

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation des réseaux LoRaWAN pour améliorer la couverture, la fiabilité et l'efficacité énergétique des communications dans les environnements urbains denses. Dans les villes intelligentes, les objets connectés doivent transmettre de petites quantités de données sur de longues distances, avec une autonomie élevée et un coût réduit. Cependant, la présence de bâtiments, d'obstacles, de trajets multiples, d'interférences et de contraintes réglementaires rend le déploiement d'un réseau LoRaWAN plus délicat qu'en environnement ouvert.

Le travail présenté analyse d'abord les fondements des réseaux LPWAN et de la technologie LoRaWAN, puis étudie la propagation radio, les indicateurs de performance et les paramètres qui influencent la qualité de transmission. Une attention particulière est accordée au facteur d'étalement, à la puissance d'émission, au temps d'occupation du canal, au taux de livraison des paquets et à la marge de lien. Sur cette base, une méthodologie d'optimisation est proposée afin d'adapter progressivement les paramètres radio selon les conditions observées.

Les résultats et analyses montrent que l'optimisation ne doit pas rechercher uniquement la portée maximale. Elle doit plutôt trouver un compromis entre robustesse radio, occupation du canal, consommation énergétique et fiabilité de service. L'approche proposée permet d'identifier les paramètres les plus adaptés aux nœuds en zone dense et constitue une base utile pour de futurs déploiements LoRaWAN urbains ou pour l'intégration d'algorithmes d'adaptation plus avancés.

Mots-clés : LoRaWAN, IoT, LPWAN, ville intelligente, propagation radio, milieu urbain dense, optimisation, ADR, couverture, efficacité énergétique.

Abstract

This master's thesis focuses on the optimization of LoRaWAN networks in order to improve coverage, reliability, and energy efficiency in dense urban environments. In smart-city applications, connected devices must transmit small amounts of data over long distances while maintaining low energy consumption and low deployment cost. However, buildings, obstacles, multipath propagation, interference, and regulatory constraints make LoRaWAN deployment in dense cities more challenging than in open environments.

The work first presents the fundamentals of LPWAN networks and the LoRaWAN technology. It then studies radio propagation, performance indicators, and the parameters that influence transmission quality. Particular attention is given to the spreading factor, transmit power, channel time-on-air, packet delivery ratio, and link margin. Based on these elements, an optimization methodology is proposed to progressively adapt radio parameters according to the observed link conditions.

The analysis shows that optimization should not only aim at maximizing radio range. It must instead find a compromise between link robustness, channel occupation, energy consumption, and service reliability. The proposed approach helps identify suitable configurations for nodes deployed in dense areas and provides a useful basis for future urban LoRaWAN deployments or for the integration of more advanced adaptive algorithms.

Keywords : LoRaWAN, IoT, LPWAN, smart city, radio propagation, dense urban environment, optimization, ADR, coverage, energy efficiency.

الملخص

تتناول هذه المذكرة موضوع تحسين شبكات لوراوان من أجل رفع جودة التغطية وموثوقية الاتصال وكفاءة استهلاك الطاقة في البيئات الحضرية الكثيفة. ففي تطبيقات المدن الذكية، تحتاج الأجهزة المتصلة إلى إرسال كميات صغيرة من البيانات لمسافات طويلة، مع الحفاظ على استهلاك طاقي منخفض وتكلفة نشر مقبولة. غير أن وجود المباني والعوائق والانعكاسات المتعددة والتداخلات الراديوية والقيود التنظيمية يجعل نشر شبكة لوراوان داخل المدن الكثيفة أكثر تعقيدا من البيئات المفتوحة.

يعرض هذا العمل أولا المفاهيم الأساسية لشبكات LPWAN وتقنية LoRaWAN، ثم يدرس نمذجة الانتشار الراديوي ومؤشرات الأداء والمعاملات التي تؤثر في جودة الإرسال. وقد تم التركيز بوجه خاص على عامل الانتشار، وقدرة الإرسال، وزمن إشغال القناة، ومعدل تسليم الرزم، وهامش الرابط الراديوي. بناء على ذلك، تم اقتراح منهجية تحسين تسمح بتكييف المعاملات الراديوية تدريجيا حسب حالة الرابط المقاسة.

توضح الدراسة أن التحسين لا ينبغي أن يهدف فقط إلى زيادة المدى الراديوي، بل يجب أن يحقق توازنا بين متانة الرابط، وإشغال القناة، واستهلاك الطاقة، وموثوقية الخدمة. كما تمثل المقاربة المقترحة قاعدة مفيدة لتحسين نشر شبكات لوراوان في المدن الكثيفة، ويمكن تطويرها مستقبلا باستعمال خوارزميات تكيفية أكثر تقدما.

الكلمات المفتاحية: لوراوان، إنترنت الأشياء، شبكات واسعة منخفضة الاستهلاك، المدينة الذكية، الانتشار الراديوي، البيئة الحضرية الكثيفة، التحسين، كفاءة الطاقة.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
الملخص	v
Liste des abréviations	xiii
Nomenclature	xiv
Introduction générale	1
1 Les réseaux LoRaWAN en environnements urbains denses	3
1.1 Introduction	3
1.2 Internet des Objets et villes intelligentes	4
1.2.1 Définition de l'Internet des Objets	4
1.2.2 Besoins de communication des applications urbaines .	5
1.3 Réseaux LPWAN	6
1.3.1 Principe général des réseaux LPWAN	6
1.3.2 Comparaison entre LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT et LTE-M	6
1.4 Technologie LoRa	8
1.4.1 Différence entre LoRa et LoRaWAN	8
1.4.2 Modulation Chirp Spread Spectrum	8
1.4.3 Facteur d'étalement	9
1.4.4 Bande passante, taux de codage et puissance d'émission	10
1.4.5 Temps d'occupation du canal	10
1.5 Architecture LoRaWAN	11
1.5.1 Topologie générale	11
1.5.2 Objets connectés	12
1.5.3 Passerelles LoRaWAN	13

1.5.4	Serveur réseau	13
1.5.5	Serveur d'application	13
1.5.6	Activation des objets et sécurité	14
1.6	Classes de dispositifs LoRaWAN	14
1.7	Propagation radio en milieu urbain dense	15
1.7.1	Effets du milieu urbain	15
1.7.2	Modèle de path loss	17
1.7.3	Bilan de liaison	17
1.7.4	Impact de la densité urbaine	17
1.8	Métriques de performance des réseaux LoRaWAN	18
1.8.1	RSSI	18
1.8.2	SNR	18
1.8.3	Packet Delivery Ratio	19
1.8.4	Packet Error Rate	19
1.8.5	Consommation énergétique	19
1.8.6	Capacité réseau	20
1.9	Contraintes réglementaires	20
1.10	Défis des réseaux LoRaWAN en environnement urbain dense	21
1.10.1	Atténuation et zones d'ombre	21
1.10.2	Collisions de paquets	21
1.10.3	Interférences radio	22
1.10.4	Compromis entre portée, débit et énergie	22
1.10.5	Limites de l'ADR	22
1.11	Travaux existants sur l'optimisation LoRaWAN	23
1.11.1	Optimisation des paramètres radio	24
1.11.2	Optimisation du placement des passerelles	24
1.11.3	Réduction des collisions	25
1.11.4	Stratégies basées sur l'intelligence artificielle	25
1.12	Synthèse comparative des approches d'optimisation	26
1.13	Positionnement de notre travail	27
1.14	Conclusion	27
2	Modélisation radio et analyse de performance	29
2.1	Introduction	29
2.2	Caractéristiques radio de LoRaWAN	30
2.2.1	Principe général de LoRa et LoRaWAN	30
2.2.2	Paramètres radio principaux	30
2.3	Propagation radio en environnement urbain dense	31
2.3.1	Atténuation et perte de trajet	31
2.3.2	Effet de masque, trajets multiples et non-ligne de vue .	32

2.4	Modèles de propagation utiles	32
2.4.1	Modèle log-distance	32
2.4.2	Modèles empiriques urbains	33
2.5	Bilan de liaison et sensibilité du récepteur	33
2.5.1	Puissance reçue	33
2.5.2	Sensibilité et marge radio	34
2.6	Métriques de performance réseau	34
2.6.1	RSSI et SNR	34
2.6.2	Packet Delivery Ratio	34
2.6.3	Temps d'occupation du canal et charge radio	35
2.7	Compromis radio et logique d'optimisation	35
2.8	Conclusion	36
3	Méthodologie expérimentale et constitution des données	37
3.1	Introduction	37
3.2	Objectifs de l'expérimentation	37
3.3	Architecture générale du système étudié	38
3.3.1	Principe de communication	38
3.3.2	Scénarios considérés	39
3.4	Matériel et outils utilisés	39
3.4.1	Équipements matériels	39
3.4.2	Environnement logiciel	40
3.5	Plan expérimental	41
3.5.1	Variables contrôlées	41
3.5.2	Variables observées	41
3.6	Chaîne de collecte et de traitement des données	42
3.6.1	Organisation générale	42
3.6.2	Structure minimale du jeu de données	42
3.6.3	Prétraitement	43
3.7	Calcul des indicateurs	43
3.8	Méthode d'évaluation	44
3.9	Reproductibilité et limites	44
3.10	Conclusion	45
4	Optimisation des paramètres radio et analyse des résultats	46
4.1	Introduction	46
4.2	Objectifs de l'optimisation	47
4.3	Indicateurs utilisés pour la décision	47
4.3.1	Marge de lien	47
4.3.2	Fiabilité	48
4.3.3	Temps d'occupation du canal	48

4.3.4	Énergie par cycle	48
4.4	Formulation multi-objectif	49
4.5	Influence des paramètres radio	49
4.5.1	Effet du facteur d'étalement	49
4.5.2	Effet de la puissance d'émission	50
4.5.3	Effet de la diversité de passerelles	50
4.6	Stratégie adaptative proposée	50
4.7	Validation numérique de la démarche	52
4.7.1	Scénario de validation	52
4.7.2	Répartition des facteurs d'étalement	53
4.7.3	Comparaison globale	54
4.8	Simulation dense LPWAN et analyse des résultats	55
4.8.1	Scénario de simulation	55
4.8.2	Topologie dense et répartition des facteurs d'étalement	56
4.8.3	Évolution du PDR avec la densité	58
4.8.4	Origine des pertes : collisions ou couverture	59
4.8.5	Charge temporelle offerte au canal	60
4.8.6	Interprétation pour l'optimisation d'un réseau urbain dense	61
4.9	Discussion	62
4.10	Limites et recommandations pratiques	62
4.11	Conclusion	63
	Conclusion générale	64
	Bibliographie	66

Table des figures

1.1	Chaîne fonctionnelle d'une application IoT dans une ville intelligente.	6
1.2	Principe simplifié de la modulation Chirp Spread Spectrum utilisée par LoRa.	8
1.3	Compromis entre portée, débit et temps d'occupation du canal en fonction du facteur d'étalement.	9
1.4	Architecture générale d'un réseau LoRaWAN selon une topologie en étoile d'étoiles.	12
1.5	Principaux phénomènes de propagation affectant un réseau LoRaWAN en environnement urbain dense.	16
1.6	Relations entre paramètres radio, canal urbain et métriques de performance LoRaWAN.	18
1.7	Principaux défis d'un réseau LoRaWAN en environnement urbain dense.	21
1.8	Chaîne d'optimisation proposée pour un réseau LoRaWAN urbain dense.	23
1.9	Compromis multi-objectif dans l'optimisation d'un réseau LoRaWAN urbain dense.	28
2.1	Bilan de liaison simplifié entre un nœud LoRaWAN et une passerelle.	32
2.2	Familles de modèles utilisables pour estimer la propagation en zone urbaine dense.	33
2.3	Indicateurs complémentaires pour l'analyse d'un lien LoRaWAN.	35
2.4	Compromis entre portée, temps de transmission, débit et consommation selon les paramètres LoRa.	36
3.1	Architecture expérimentale retenue pour l'étude d'un réseau LoRaWAN urbain dense.	38
3.2	Chaîne de collecte, nettoyage et exploitation des données expérimentales.	42
3.3	Indicateurs calculés à partir des trames collectées.	44

4.1	Chaîne générale d'optimisation des paramètres radio LoRa-WAN en environnement urbain dense.	46
4.2	Compromis normalisé entre robustesse, débit utile et temps d'occupation du canal en fonction du facteur d'étalement. . .	50
4.3	Organigramme de la stratégie adaptative proposée pour l'optimisation du SF et de la puissance d'émission.	51
4.4	Principe d'hystérèse utilisé pour stabiliser la décision d'optimisation.	51
4.5	Exemple de carte de qualité de lien et d'attribution du facteur d'étalement selon la marge radio.	53
4.6	Exemple de redistribution des facteurs d'étalement après optimisation.	54
4.7	Comparaison normalisée entre configuration initiale et configuration optimisée.	54
4.8	Topologie simulée d'un réseau LPWAN dense avec 1000 objets connectés.	57
4.9	Distribution des facteurs d'étalement pour le scénario dense à 1000 nœuds.	58
4.10	Évolution du Packet Delivery Ratio en fonction du nombre de nœuds.	59
4.11	Évolution des pertes par collision et des pertes de couverture en fonction de la densité.	60
4.12	Occupation temporelle offerte du canal en fonction du nombre de nœuds.	61

Liste des tableaux

1.1	Comparaison synthétique de quelques technologies LPWAN .	7
1.2	Comparaison des classes de dispositifs LoRaWAN	15
1.3	Synthèse des principales approches d'optimisation LoRaWAN	26
2.1	Effet qualitatif des principaux paramètres LoRa sur les performances radio	31
3.1	Éléments matériels et rôle dans l'expérimentation	40
3.2	Outils logiciels recommandés pour une étude LoRaWAN reproductible	41
3.3	Paramètres expérimentaux à renseigner pour chaque scénario	42
3.4	Structure recommandée d'un fichier de mesures LoRaWAN .	43
4.1	Paramètres utilisés pour la validation numérique	53
4.2	Synthèse qualitative des effets attendus de l'optimisation . .	55
4.3	Paramètres principaux de la simulation LPWAN dense	56
4.4	Résultats de simulation en fonction de la densité de nœuds .	58
4.5	Recommandations pratiques pour un réseau LoRaWAN urbain dense	63

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ADR	Adaptive Data Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
IoT	Internet of Things / Internet des Objets
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
PDR	Packet Delivery Ratio
QoS	Quality of Service
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNR	Signal-to-Noise Ratio

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
P_t	Puissance d'émission	dBm
P_r	Puissance reçue	dBm
$PL(d)$	Perte de trajet à la distance d	dB
d	Distance entre l'émetteur et le récepteur	m
f	Fréquence porteuse	Hz
BW	Bande passante	Hz
T_{air}	Temps d'occupation du canal	s

Introduction générale

Les villes modernes connaissent une transformation profonde sous l'effet de la numérisation des services, de la généralisation des capteurs et de l'essor de l'Internet des Objets. Les systèmes de supervision urbaine, de télérelève, de suivi environnemental, de stationnement intelligent ou encore de gestion de l'éclairage public reposent de plus en plus sur des objets communicants capables de transmettre régulièrement des informations vers des plateformes de traitement. Ces applications ne nécessitent pas toujours un haut débit, mais elles exigent une grande autonomie énergétique, une large couverture et un coût de déploiement raisonnable.

Dans ce contexte, les réseaux LPWAN occupent une place importante. Ils ont été conçus pour connecter un grand nombre d'objets à faible consommation sur de longues distances. Parmi eux, LoRaWAN est devenu l'un des protocoles les plus utilisés grâce à son fonctionnement dans les bandes non licenciées, sa simplicité d'intégration et son adaptation aux applications de ville intelligente [1, 2, 3]. Toutefois, le passage d'un scénario théorique à un déploiement urbain dense fait apparaître plusieurs difficultés : atténuation par les bâtiments, trajets multiples, zones d'ombre, collisions, limitations de duty cycle et hétérogénéité des conditions de propagation.

La performance d'un réseau LoRaWAN ne peut donc pas être évaluée uniquement par la distance de communication. Elle dépend d'un équilibre entre la couverture, la fiabilité, le débit utile, l'occupation du canal et l'énergie consommée par les nœuds. Un facteur d'étalement élevé améliore la sensibilité du récepteur, mais augmente fortement le temps d'émission. À l'inverse, un facteur d'étalement faible réduit l'occupation du canal et la consommation, mais nécessite une meilleure qualité de lien. Le même raisonnement s'applique à la puissance d'émission : l'augmenter peut stabiliser un lien difficile, mais une valeur trop élevée entraîne un coût énergétique inutile et peut accentuer la charge radio.

La problématique de ce mémoire peut ainsi être formulée comme suit :

comment optimiser les paramètres radio d'un réseau LoRaWAN afin d'améliorer la couverture et la fiabilité des communications dans un environnement urbain dense, tout en limitant l'occupation du canal et la consommation énergétique ?

Pour répondre à cette question, ce travail propose une démarche progressive. Le premier chapitre présente les fondements de LoRaWAN et les enjeux des réseaux IoT urbains. Le deuxième chapitre analyse la modélisation radio et les indicateurs de performance nécessaires à l'évaluation d'un lien. Le troisième chapitre décrit la méthodologie expérimentale et la constitution des données. Le quatrième chapitre développe une stratégie d'optimisation des paramètres radio et discute les résultats attendus, les limites et les recommandations pratiques. Enfin, la conclusion générale synthétise les apports du travail et ouvre des perspectives vers des campagnes de mesures réelles, la comparaison avec l'ADR classique et l'utilisation de méthodes d'apprentissage léger.

Chapitre 1

Les réseaux LoRaWAN en environnements urbains denses

1.1 Introduction

L'Internet des Objets, ou *Internet of Things* (IoT), constitue aujourd'hui l'un des piliers technologiques des villes intelligentes. Il permet de connecter des capteurs, des actionneurs et des plateformes de supervision afin de collecter, transmettre et exploiter des données issues de l'environnement urbain. Les applications concernées sont nombreuses : surveillance environnementale, gestion intelligente de l'éclairage public, suivi du trafic, stationnement intelligent, gestion de l'eau, suivi énergétique, collecte des déchets, sécurité urbaine et maintenance prédictive des infrastructures.

Dans ce contexte, les réseaux de communication doivent répondre à des contraintes spécifiques. Contrairement aux applications multimédias ou aux communications mobiles haut débit, les applications IoT urbaines transmettent généralement de petites quantités de données, à intervalles espacés, avec une forte exigence d'autonomie énergétique. Les objets connectés peuvent être déployés en grand nombre, parfois dans des zones difficiles d'accès, ce qui impose des solutions peu coûteuses, peu consommatrices d'énergie et capables de couvrir de larges zones géographiques. Les réseaux LPWAN, pour *Low Power Wide Area Networks*, ont été développés pour répondre à ces besoins. Parmi ces technologies, LoRaWAN occupe une place importante grâce à sa longue portée, sa faible consom-

mation, son fonctionnement dans des bandes non licenciées et son adaptation aux applications massives de l’IoT. Cependant, dans les environnements urbains denses, les performances de LoRaWAN peuvent être fortement dégradées par l’atténuation du signal, les trajets multiples, les obstacles, les interférences radio, la forte densité de nœuds et les contraintes réglementaires telles que le *duty cycle*.

L’objectif de ce chapitre est donc de présenter un état de l’art complet sur les réseaux LoRaWAN appliqués aux environnements urbains denses. Le chapitre commence par introduire l’IoT et les villes intelligentes, puis présente les réseaux LPWAN et la technologie LoRa. Il détaille ensuite l’architecture LoRaWAN, les classes de dispositifs, les paramètres radio, les contraintes de propagation urbaine et les métriques de performance. Enfin, il analyse les principaux défis d’optimisation liés à la couverture, à la fiabilité, à la capacité, à l’énergie et au placement optimal des passerelles.

1.2 Internet des Objets et villes intelligentes

1.2.1 Définition de l’Internet des Objets

L’Internet des Objets désigne un ensemble de dispositifs physiques capables de mesurer, traiter et transmettre des données à travers un réseau de communication. Ces dispositifs peuvent être des capteurs de température, d’humidité, de pollution, de luminosité, de présence, de vibration, de niveau d’eau, de consommation énergétique ou encore de positionnement. Ils peuvent également être des actionneurs capables d’agir sur l’environnement, par exemple en commandant un éclairage public, une vanne, un moteur ou un système d’alerte.

Un système IoT complet repose généralement sur quatre niveaux principaux :

- le niveau perception, constitué des capteurs et actionneurs ;
- le niveau communication, assurant la transmission des données ;
- le niveau traitement, chargé du stockage, de l’analyse et de l’exploitation des données ;
- le niveau application, correspondant au service final offert à l’utilisateur ou à l’exploitant.

Dans une ville intelligente, l'IoT permet d'améliorer la gestion des ressources, de réduire les coûts d'exploitation, d'optimiser les interventions de maintenance et d'améliorer la qualité de vie des citoyens. Les données collectées en temps réel ou quasi réel permettent aux décideurs de mieux comprendre le fonctionnement de la ville et d'adapter les services publics aux besoins réels.

1.2.2 Besoins de communication des applications urbaines

Les applications IoT urbaines possèdent des caractéristiques particulières qui les distinguent des communications classiques. Les volumes de données sont souvent faibles, mais les objets peuvent être très nombreux. Les transmissions sont généralement périodiques ou événementielles. Par exemple, un capteur de qualité de l'air peut transmettre une mesure toutes les dix minutes, tandis qu'un capteur de fuite d'eau peut transmettre uniquement lorsqu'une anomalie est détectée.

Les principaux besoins de communication des applications urbaines sont les suivants :

- une grande portée radio afin de limiter le nombre de stations de réception ;
- une faible consommation énergétique pour garantir plusieurs années d'autonomie ;
- un coût réduit des équipements et de l'infrastructure ;
- une capacité suffisante pour supporter un grand nombre de nœuds ;
- une bonne robustesse face aux interférences et aux obstacles urbains ;
- une sécurité suffisante pour protéger les données et l'accès au réseau ;
- une maintenance réduite après le déploiement.

Ces contraintes expliquent pourquoi les réseaux LPWAN sont devenus des solutions privilégiées pour les applications de ville intelligente.

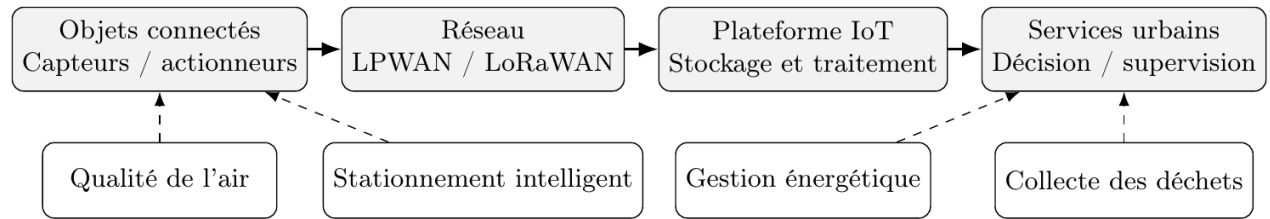


Fig. 1.1 : Chaîne fonctionnelle d'une application IoT dans une ville intelligente.

1.3 Réseaux LPWAN

1.3.1 Principe général des réseaux LPWAN

Les réseaux LPWAN sont des réseaux sans fil conçus pour connecter un grand nombre d'objets à faible consommation sur de longues distances. Ils occupent une position intermédiaire entre les réseaux personnels de courte portée, comme Bluetooth ou ZigBee, et les réseaux cellulaires, comme 4G, LTE-M, NB-IoT ou 5G.

Le principe des LPWAN consiste à privilégier la portée, l'autonomie et le faible coût au détriment du débit. Les débits offerts sont généralement faibles, mais suffisants pour des mesures périodiques ou des messages courts. Cette approche correspond parfaitement aux besoins des applications de surveillance urbaine.

Les principales technologies LPWAN sont :

- LoRaWAN, utilisant la modulation LoRa dans des bandes non licenciées ;
- Sigfox, réseau propriétaire orienté messages courts ;
- NB-IoT, technologie cellulaire normalisée par le 3GPP ;
- LTE-M, solution cellulaire adaptée aux objets mobiles et aux débits plus élevés.

1.3.2 Comparaison entre LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT et LTE-M

Le choix d'une technologie LPWAN dépend de plusieurs critères : portée, débit, consommation, coût, disponibilité du réseau, qualité de service, sé-

curité, mobilité et contraintes réglementaires. LoRaWAN présente l'avantage de pouvoir être déployé sous forme de réseau privé ou public, ce qui le rend particulièrement intéressant pour les universités, collectivités locales, zones industrielles et projets expérimentaux.

Tab. 1.1 : Comparaison synthétique de quelques technologies LPWAN

Technologie	Bande	Débit	Avantages	Limites
LoRaWAN	Non licenciée ISM	Faible à modéré	Longue portée, faible consommation, réseau privé possible	Sensible aux collisions, duty cycle, débit limité
Sigfox	Non licenciée ISM	Très faible	Simplicité, faible consommation	Nombre de messages limité, dépendance opérateur
NB-IoT	Licenciée cellulaire	Modéré	Bonne couverture, qualité de service, sécurité opérateur	Coût, dépendance infrastructure cellulaire
LTE-M	Licenciée cellulaire	Plus élevé	Mobilité, latence réduite, voix possible	Consommation et coût plus élevés

Dans le cadre de notre travail, le LoRaWAN est particulièrement pertinent car il permet d'étudier à la fois les problématiques radio, réseau et optimisation. Il offre également une grande flexibilité pour simuler ou expérimenter différents scénarios urbains.

1.4 Technologie LoRa

1.4.1 Différence entre LoRa et LoRaWAN

Il est important de distinguer LoRa et LoRaWAN. LoRa désigne la couche physique radio, c'est-à-dire la technique de modulation utilisée pour transmettre le signal. LoRaWAN désigne le protocole réseau et MAC qui définit l'architecture, les classes de dispositifs, les mécanismes d'accès au canal, la sécurité, l'activation des objets, la gestion des messages et l'adaptation des paramètres radio.

Ainsi, LoRa répond principalement à la question : « comment le signal est-il transmis sur l'interface radio ? » tandis que LoRaWAN répond à la question : « comment les objets, les passerelles et les serveurs communiquent-ils dans un réseau complet ? » La Figure 1.2 illustre le principe simplifié d'un signal chirp. La fréquence instantanée varie progressivement au cours du temps, ce qui permet d'étaler l'information et d'améliorer la robustesse de la transmission.

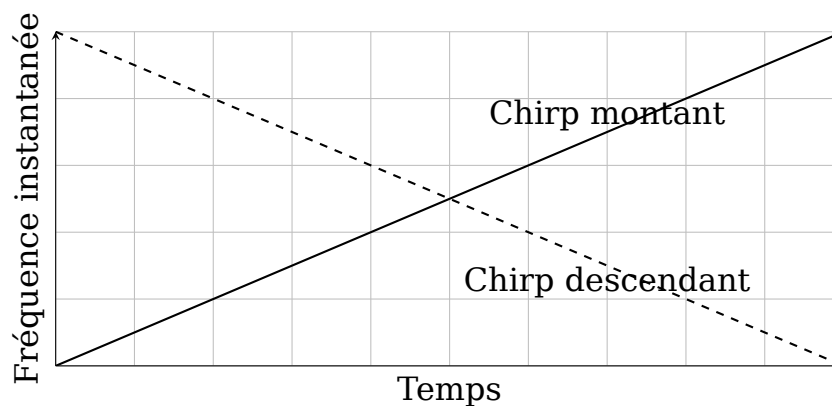


Fig. 1.2 : Principe simplifié de la modulation Chirp Spread Spectrum utilisée par LoRa.

1.4.2 Modulation Chirp Spread Spectrum

La technologie LoRa repose sur une modulation à étalement de spectre par chirp, appelée *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Un chirp est un signal dont la fréquence varie progressivement au cours du temps. Cette technique permet d'étaler l'information sur une bande de fréquence plus large que celle strictement nécessaire, ce qui améliore la robustesse face au bruit, aux interférences et aux atténuations du canal.

L'un des principaux avantages de la modulation LoRa est sa capacité à

fonctionner avec des rapports signal sur bruit faibles, voire négatifs. Cela signifie qu'un récepteur LoRa peut parfois décoder un signal dont la puissance est inférieure au niveau de bruit apparent. Cette propriété est essentielle pour atteindre de longues distances avec une puissance d'émission limitée.

1.4.3 Facteur d'étalement

Le facteur d'étalement, ou *Spreading Factor* (SF), est l'un des paramètres les plus importants de LoRa. Il détermine le nombre de symboles utilisés pour représenter l'information. Les valeurs courantes vont de SF7 à SF12. Un SF élevé augmente la sensibilité du récepteur et améliore la portée, mais il réduit le débit et augmente le temps d'occupation du canal. La Figure 1.3 résume le compromis associé au facteur d'étalement. Un SF élevé améliore la robustesse et la portée, mais augmente le temps d'occupation du canal et réduit le débit utile.

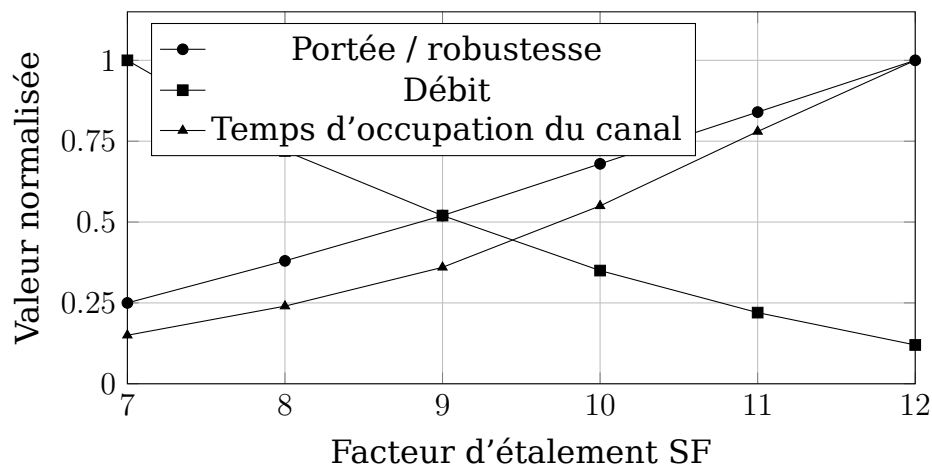


Fig. 1.3 : Compromis entre portée, débit et temps d'occupation du canal en fonction du facteur d'étalement.

Le compromis peut être résumé ainsi :

- un faible SF, par exemple SF7, offre un débit plus élevé et un temps d'émission réduit, mais une portée plus faible ;
- un SF élevé, par exemple SF12, offre une meilleure portée et une meilleure robustesse, mais augmente fortement le temps d'émission et donc la probabilité de collision.

Le débit symbole peut être exprimé par :

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}}, \quad (1.1)$$

où BW représente la bande passante et SF le facteur d'étalement.

Cette relation montre qu'une augmentation du SF diminue le débit symbole. Le choix du SF constitue donc un levier fondamental pour l'optimisation de la couverture, de la capacité et de la consommation énergétique.

1.4.4 Bande passante, taux de codage et puissance d'émission

La bande passante, notée BW , influence directement le débit, la sensibilité et la robustesse. Les valeurs courantes sont 125 kHz, 250 kHz et 500 kHz. Une bande passante plus large permet d'augmenter le débit, mais peut réduire la sensibilité du récepteur.

Le taux de codage, ou *Coding Rate* (CR), ajoute de la redondance afin d'améliorer la correction d'erreurs. Une redondance plus élevée améliore la robustesse, mais augmente le temps d'émission.

La puissance d'émission influence directement la portée radio et la consommation énergétique. Une puissance plus élevée peut améliorer la réception, mais elle augmente la consommation et peut contribuer aux interférences. Dans un réseau dense, augmenter systématiquement la puissance n'est donc pas une solution optimale.

1.4.5 Temps d'occupation du canal

Le temps d'occupation du canal, ou *Time on Air* (ToA), représente la durée pendant laquelle un message occupe le canal radio. Il dépend principalement du SF , de la bande passante, du taux de codage, de la taille du payload et de la présence éventuelle d'un en-tête ou d'un contrôle d'erreur.

Le ToA est une métrique essentielle car il influence :

- la consommation énergétique du nœud ;
- la probabilité de collision ;
- le respect du duty cycle ;

- la capacité globale du réseau.

Dans un réseau urbain dense, les nœuds utilisant des SF élevés occupent le canal plus longtemps, ce qui augmente la probabilité de collision avec d'autres transmissions. L'optimisation du SF et du ToA est donc un enjeu central du dimensionnement LoRaWAN.

1.5 Architecture LoRaWAN

1.5.1 Topologie générale

LoRaWAN repose sur une architecture dite en étoile d'étoiles. Les objets connectés communiquent directement avec une ou plusieurs passerelles. Les passerelles transmettent ensuite les paquets vers un serveur réseau à travers une connexion IP, par exemple Ethernet, Wi-Fi, fibre ou réseau cellulaire.

Contrairement aux réseaux maillés, les objets LoRaWAN ne relaient pas les messages d'autres objets. Chaque objet transmet directement vers les passerelles disponibles. Cette architecture simplifie les dispositifs terminaux et réduit leur consommation, mais elle rend le placement des passerelles particulièrement important pour garantir une bonne couverture.

L'architecture LoRaWAN comprend principalement :

- les objets connectés, ou *End Devices* :ED ;
- les passerelles, ou *Gateways* : GW ;
- le serveur réseau, ou *Network Server* ;
- le serveur d'application, ou *Application Server* ;
- éventuellement un serveur de jointure, ou *Join Server*, pour la gestion de l'activation et des clés.

La Figure 1.4 présente l'architecture générale d'un réseau LoRaWAN. Les objets connectés transmettent leurs messages vers une ou plusieurs passerelles, qui les relaient ensuite vers le serveur réseau à travers une connexion IP.

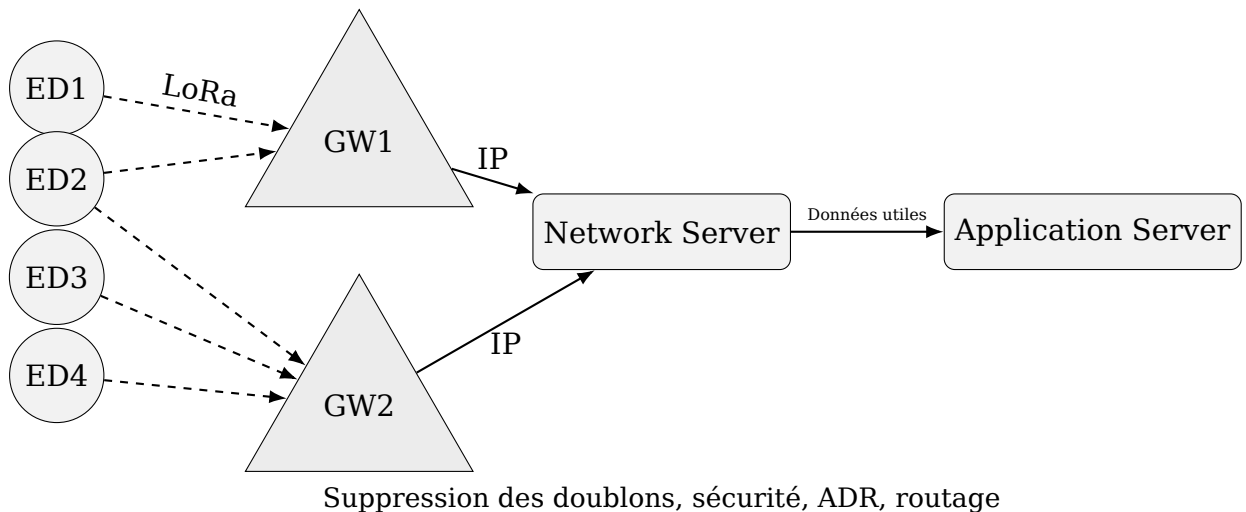


Fig. 1.4 : Architecture générale d'un réseau LoRaWAN selon une topologie en étoile d'étoiles.

1.5.2 Objets connectés

Les objets connectés sont les dispositifs qui collectent les données sur le terrain. Ils peuvent être fixes ou mobiles, alimentés par batterie, par secteur ou par récupération d'énergie. Leur rôle est de mesurer une grandeur physique, de construire un message et de le transmettre au réseau. Dans une application urbaine, un objet connecté peut être :

- un capteur de pollution ;
- un compteur d'eau ou d'énergie ;
- un capteur de présence pour stationnement intelligent ;
- un capteur de luminosité pour l'éclairage public ;
- un capteur de niveau de remplissage de conteneur ;
- un capteur de vibration pour infrastructure ou machine.

L'autonomie énergétique des objets constitue une contrainte majeure. Les transmissions radio étant généralement les opérations les plus coûteuses en énergie, les objets doivent limiter la fréquence d'envoi, optimiser la taille des messages et utiliser les paramètres radio les plus efficaces.

1.5.3 Passerelles LoRaWAN

Les passerelles assurent le relais entre les objets connectés et le serveur réseau. Elles reçoivent les trames LoRa émises par les objets, les encapsulent dans des paquets IP et les transmettent au serveur réseau. Une même trame peut être reçue par plusieurs passerelles, ce qui améliore la diversité spatiale et la fiabilité du réseau.

Dans un environnement urbain dense, le placement des passerelles est déterminant. Une passerelle placée en hauteur, avec une bonne visibilité radio, peut couvrir une zone plus large. Cependant, les bâtiments, rues étroites, obstacles métalliques, murs épais et zones en intérieur peuvent créer des zones d'ombre. Le nombre, la hauteur, la position et l'orientation des passerelles influencent donc fortement la couverture radio.

1.5.4 Serveur réseau

Le serveur réseau est l'élément central de l'architecture LoRaWAN. Il assure plusieurs fonctions :

- élimination des paquets dupliqués reçus par plusieurs passerelles ;
- vérification de l'intégrité et de l'authenticité des messages ;
- gestion des compteurs de trames ;
- sélection de la passerelle pour les messages descendants ;
- gestion de l'Adaptive Data Rate ;
- routage des données vers le serveur d'application.

Dans un réseau dense, le serveur réseau joue un rôle essentiel dans l'optimisation des paramètres radio. Il peut recommander à un objet de modifier son SF, sa puissance d'émission ou son nombre de retransmissions afin d'améliorer la performance globale.

1.5.5 Serveur d'application

Le serveur d'application reçoit les données utiles après traitement par le serveur réseau. Il est chargé de décoder les payloads, de stocker les mesures, de les afficher, de générer des alertes ou d'alimenter des algorithmes d'analyse. Dans une ville intelligente, le serveur d'application

peut être connecté à une plateforme de supervision, un tableau de bord, une base de données ou un système d'aide à la décision.

1.5.6 Activation des objets et sécurité

LoRaWAN prévoit deux modes principaux d'activation :

- *Activation By Personalization* (ABP), où les clés et adresses sont configurées manuellement ;
- *Over-The-Air Activation* (OTAA), où l'objet rejoint dynamiquement le réseau à travers une procédure sécurisée.

Le mode OTAA est généralement recommandé pour les déploiements réels, car il offre une meilleure gestion des clés et une meilleure flexibilité. La sécurité LoRaWAN repose sur des mécanismes cryptographiques permettant d'assurer l'authentification, l'intégrité et la confidentialité des données.

1.6 Classes de dispositifs LoRaWAN

LoRaWAN définit trois classes de dispositifs : classe A, classe B et classe C. Ces classes se distinguent principalement par leur comportement en réception, leur latence descendante et leur consommation énergétique.

Tab. 1.2 : Comparaison des classes de dispositifs LoRaWAN

Classe	Principe	Latence downlink	Consommation	Applications typiques
Classe A	Deux fe- nêtres de réception après chaque émission uplink	Élevée et dé- pendante de l'objet	Très faible	Capteurs sur batterie, mesures pé- riodiques
Classe B	Fenêtres de réception planifiées grâce à des balises ré- seau	Moyenne et prévisible	Moyenne	Capteurs nécessitant une synchro- nisation
Classe C	Réception quasi conti- nue sauf pendant l'émission	Faible	Élevée	Actionneurs, dispositifs alimentés par secteur

La classe A est la plus utilisée dans les applications IoT urbaines alimentées par batterie. Elle offre la meilleure autonomie énergétique, mais limite les communications descendantes. La classe B introduit une réception planifiée, utile pour des applications nécessitant une latence plus maîtrisée. La classe C offre la latence la plus faible, mais elle est adaptée principalement aux dispositifs alimentés en continu.

1.7 Propagation radio en milieu urbain dense

1.7.1 Effets du milieu urbain

La propagation radio en milieu urbain dense est complexe. Les signaux radio sont affectés par de nombreux phénomènes :

- l'atténuation avec la distance ;
- l'obstruction par les bâtiments ;

- la diffraction autour des obstacles ;
- les réflexions sur les façades, véhicules et structures métalliques ;
- les trajets multiples ;
- le shadowing dû aux obstacles fixes ;
- les variations temporelles liées au trafic, aux personnes et aux conditions environnementales.

La Figure 1.5 montre les phénomènes qui dégradent la qualité radio en milieu urbain dense : obstruction par les bâtiments, zones d'ombre, diffraction, réflexion et trajets multiples.

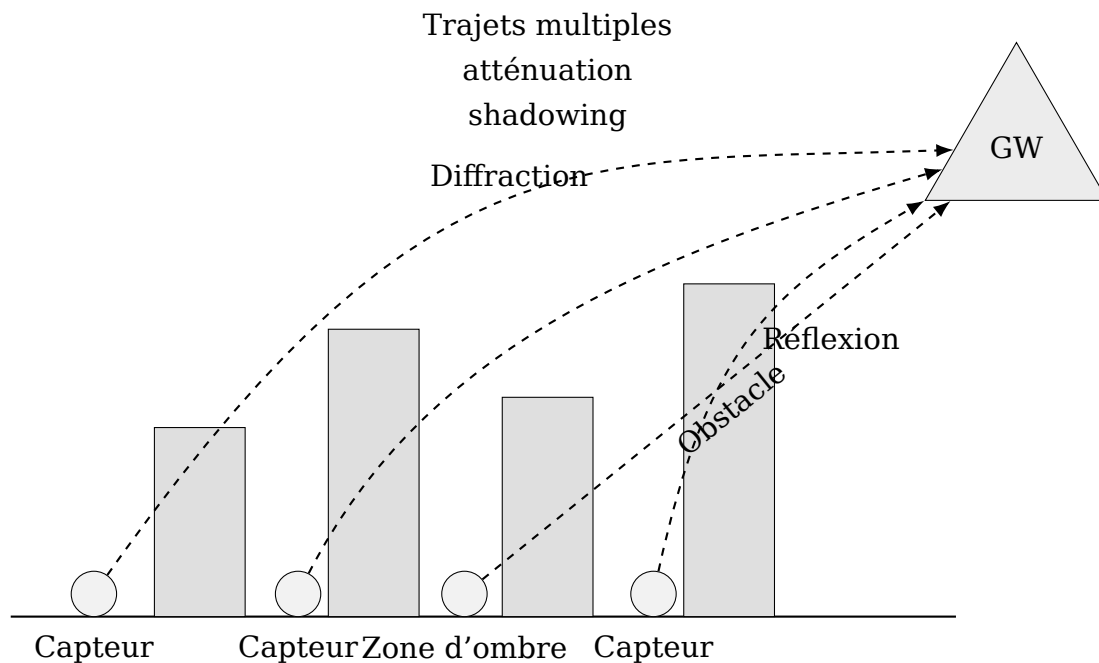


Fig. 1.5 : Principaux phénomènes de propagation affectant un réseau LoRaWAN en environnement urbain dense.

Ces phénomènes rendent la couverture difficile à prédire. Deux nœuds situés à la même distance d'une passerelle peuvent présenter des niveaux RSSI et SNR très différents selon la visibilité radio, la hauteur d'antenne, l'environnement immédiat et la présence d'obstacles.

1.7.2 Modèle de path loss

Un modèle simple et largement utilisé pour représenter l'atténuation radio est le modèle logarithmique avec shadowing :

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (1.2)$$

où $PL(d)$ est la perte de propagation à la distance d , $PL(d_0)$ est la perte à une distance de référence d_0 , n est l'exposant de perte de propagation et X_σ est une variable aléatoire gaussienne représentant le shadowing.

En milieu urbain dense, la valeur de n est généralement plus élevée qu'en espace libre, car les obstacles augmentent l'atténuation. Le terme X_σ permet de représenter les variations locales dues aux bâtiments, aux rues, aux arbres, aux véhicules et aux conditions d'installation des antennes.

1.7.3 Bilan de liaison

Le bilan de liaison permet d'estimer la puissance reçue par une passerelle. Il peut être exprimé par :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d) - L_s, \quad (1.3)$$

où P_r est la puissance reçue, P_t la puissance d'émission, G_t et G_r les gains d'antennes, $PL(d)$ la perte de propagation et L_s les pertes supplémentaires du système.

La communication est possible si la puissance reçue reste supérieure à la sensibilité du récepteur :

$$P_r \geq S_{rx}, \quad (1.4)$$

où S_{rx} dépend notamment du SF, de la bande passante et du bruit thermique.

1.7.4 Impact de la densité urbaine

Dans un environnement urbain dense, la couverture n'est pas seulement limitée par la distance. Elle dépend aussi de la structure de la ville. Les rues étroites peuvent canaliser les signaux dans certaines directions, tandis que les bâtiments élevés peuvent créer des zones d'ombre. Les capteurs placés en sous-sol, dans des parkings, dans des coffrets métalliques

ou à l'intérieur de bâtiments peuvent subir une atténuation supplémentaire importante.

Cette variabilité justifie l'utilisation de mesures réelles, de simulations radio ou de données géographiques urbaines pour améliorer le placement des passerelles et la configuration des paramètres radio.

1.8 Métriques de performance des réseaux LoRaWAN

La Figure 1.6 met en évidence les relations entre les paramètres radio, les conditions de propagation et les métriques de performance utilisées pour évaluer un réseau LoRaWAN.

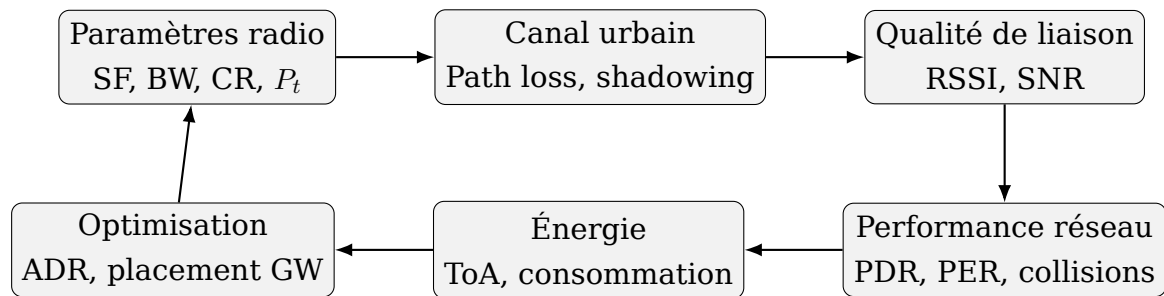


Fig. 1.6 : Relations entre paramètres radio, canal urbain et métriques de performance LoRaWAN.

1.8.1 RSSI

Le RSSI, ou *Received Signal Strength Indicator*, représente la puissance du signal reçu. Il est généralement exprimé en dBm. Une valeur RSSI plus élevée indique une réception plus forte. Cependant, le RSSI seul ne suffit pas à évaluer la qualité de communication, car un signal fort peut être perturbé par du bruit ou des interférences.

1.8.2 SNR

Le SNR, ou *Signal-to-Noise Ratio*, représente le rapport entre la puissance du signal utile et la puissance du bruit. Il est exprimé en dB. En LoRa, certains messages peuvent être décodés avec des SNR faibles, voire négatifs, grâce à la robustesse de la modulation CSS. Le SNR est donc une métrique importante pour évaluer la marge de liaison.

1.8.3 Packet Delivery Ratio

Le *Packet Delivery Ratio* (PDR) mesure la proportion de paquets correctement reçus par rapport au nombre de paquets transmis :

$$PDR = \frac{N_{\text{reçus}}}{N_{\text{transmis}}} \times 100. \quad (1.5)$$

Le PDR est l'une des métriques les plus importantes pour évaluer la fiabilité d'un réseau LoRaWAN. Il dépend de la couverture radio, du niveau d'interférence, des collisions, du SF, de la puissance d'émission, de la charge réseau et du placement des passerelles.

1.8.4 Packet Error Rate

Le taux d'erreur paquet, ou *Packet Error Rate* (PER), est défini par :

$$PER = 1 - \frac{N_{\text{reçus}}}{N_{\text{transmis}}}. \quad (1.6)$$

Un PER élevé indique une mauvaise fiabilité. Dans un réseau dense, le PER peut augmenter à cause des collisions, des interférences ou d'une mauvaise répartition des SF.

1.8.5 Consommation énergétique

La consommation énergétique d'un objet LoRaWAN dépend de ses phases de fonctionnement : émission, réception, traitement et sommeil. Une approximation de l'énergie consommée pendant un cycle peut être donnée par :

$$E_{\text{cycle}} = V (I_{\text{tx}}T_{\text{tx}} + I_{\text{rx}}T_{\text{rx}} + I_{\text{sleep}}T_{\text{sleep}}), \quad (1.7)$$

où V est la tension d'alimentation, I_{tx} , I_{rx} et I_{sleep} sont les courants en émission, réception et sommeil, et T_{tx} , T_{rx} , T_{sleep} les durées correspondantes.

Le temps d'émission T_{tx} dépend fortement du SF. Ainsi, un objet utilisant SF12 consomme plus d'énergie par message qu'un objet utilisant SF7, car il reste plus longtemps en émission.

1.8.6 Capacité réseau

La capacité d'un réseau LoRaWAN correspond au nombre de messages ou de dispositifs pouvant être supportés avec un niveau de fiabilité acceptable. Elle dépend :

- du nombre de passerelles ;
- du nombre de canaux disponibles ;
- de la distribution des SF ;
- du trafic généré par les objets ;
- du duty cycle ;
- du taux de collisions ;
- des retransmissions éventuelles.

Dans les réseaux urbains denses, la capacité devient un enjeu majeur car le nombre d'objets peut être très élevé sur une surface réduite.

1.9 Contraintes réglementaires

LoRaWAN fonctionne généralement dans des bandes ISM non licenciées. En Europe, la bande EU868 est couramment utilisée. L'utilisation de ces bandes est soumise à des contraintes réglementaires, notamment en termes de puissance d'émission et de duty cycle.

Le duty cycle limite le pourcentage de temps pendant lequel un dispositif peut émettre sur une sous-bande donnée. Par exemple, un duty cycle de 1% signifie qu'un objet ne peut émettre que pendant 1% du temps sur la sous-bande concernée. Cette contrainte vise à limiter l'occupation du spectre et à réduire les interférences entre dispositifs.

Dans un réseau dense, le duty cycle limite la fréquence d'envoi des messages et impose une gestion efficace du temps d'occupation du canal. Les messages longs, les SF élevés et les retransmissions peuvent rapidement consommer le temps d'émission autorisé. L'optimisation doit donc prendre en compte à la fois les performances radio et la conformité réglementaire.

1.10 Défis des réseaux LoRaWAN en environnement urbain dense

La Figure 1.7 synthétise les principaux défis rencontrés lors du déploiement d'un réseau LoRaWAN en environnement urbain dense.

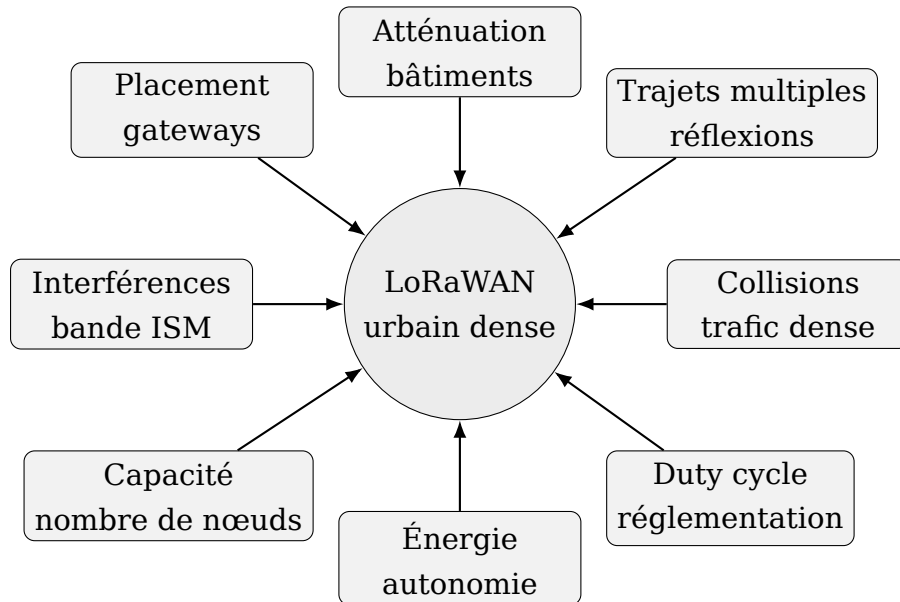


Fig. 1.7 : Principaux défis d'un réseau LoRaWAN en environnement urbain dense.

1.10.1 Atténuation et zones d'ombre

Le premier défi est la couverture radio. Les bâtiments, murs, parkings souterrains, structures métalliques et différences de hauteur créent des zones d'ombre. Certains capteurs peuvent être proches d'une passerelle mais présenter une mauvaise qualité radio en raison d'obstacles importants.

1.10.2 Collisions de paquets

LoRaWAN utilise un mécanisme d'accès aléatoire de type ALOHA pour les transmissions uplink. Les objets transmettent sans coordination stricte avec les autres objets. Dans un réseau peu chargé, cette simplicité est avantageuse. En revanche, dans un réseau dense, elle augmente la probabilité de collision.

Une collision peut se produire lorsque deux objets transmettent simulta-

nément sur la même fréquence et avec le même SF. Des interférences peuvent également apparaître entre SF différents, notamment lorsque les puissances reçues sont très différentes.

1.10.3 Interférences radio

Les bandes ISM sont partagées avec d'autres systèmes radio. Les réseaux LoRaWAN peuvent donc subir des interférences provenant d'autres dispositifs utilisant les mêmes bandes. En ville dense, la concentration d'objets connectés et de réseaux radio peut augmenter le niveau d'interférence.

1.10.4 Compromis entre portée, débit et énergie

Le choix du SF illustre le compromis fondamental de LoRaWAN :

- augmenter le SF améliore la portée mais réduit le débit ;
- réduire le SF diminue le temps d'émission et l'énergie consommée, mais peut dégrader la couverture ;
- augmenter la puissance d'émission peut améliorer la liaison mais augmente la consommation et les interférences.

L'optimisation d'un réseau LoRaWAN consiste donc à trouver un équilibre entre couverture, fiabilité, capacité et énergie.

1.10.5 Limites de l'ADR

L'*Adaptive Data Rate* (ADR) est un mécanisme permettant d'adapter dynamiquement certains paramètres radio, notamment le SF et la puissance d'émission. Il est particulièrement utile pour les objets fixes dont les conditions radio varient peu.

Cependant, l'ADR peut présenter des limites dans les environnements urbains denses :

- les conditions radio peuvent varier fortement dans le temps ;
- les objets mobiles ou semi-mobiles peuvent rendre les décisions ADR moins stables ;

- les décisions individuelles peuvent ne pas optimiser la capacité globale;
- une mauvaise distribution des SF peut augmenter les collisions.

Ces limites justifient l'étude de stratégies adaptatives plus avancées, éventuellement basées sur des règles intelligentes ou des méthodes d'apprentissage automatique léger.

1.11 Travaux existants sur l'optimisation LoRaWAN

La Figure 1.8 présente la logique générale d'optimisation retenue pour notre travail. Les données radio et géographiques alimentent un modèle de propagation, puis une stratégie d'optimisation agit sur les paramètres radio, le placement des passerelles et les règles adaptatives.

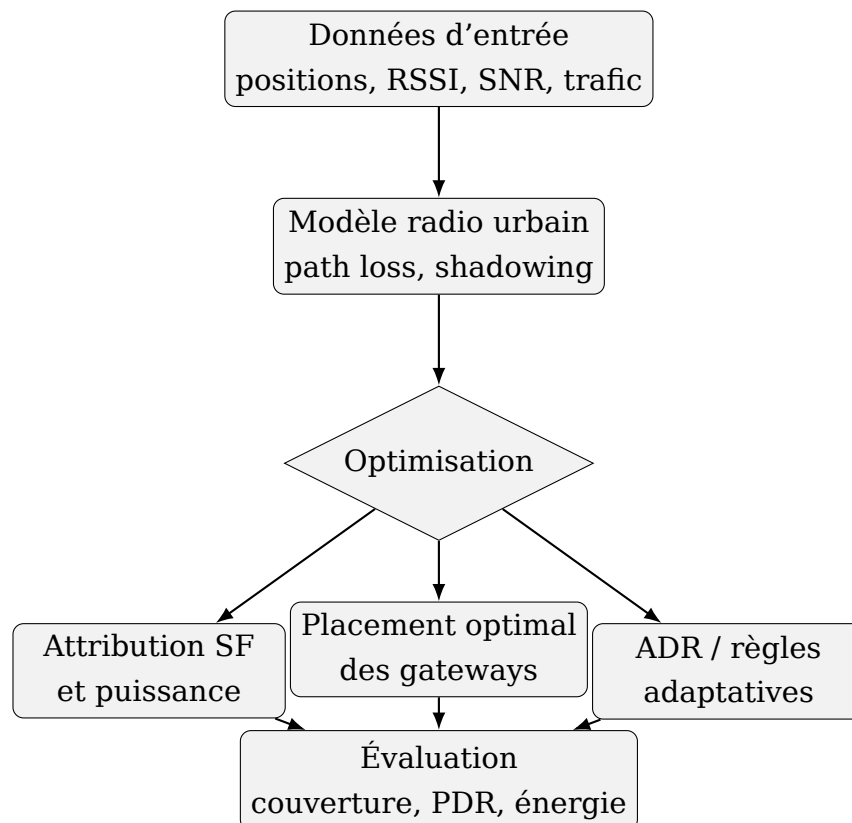


Fig. 1.8 : Chaîne d'optimisation proposée pour un réseau LoRaWAN urbain dense.

1.11.1 Optimisation des paramètres radio

De nombreux travaux se sont intéressés à l'optimisation des paramètres radio LoRaWAN. Les paramètres les plus étudiés sont le SF, la puissance d'émission, le canal, le taux de codage et le nombre de retransmissions. L'objectif est généralement d'améliorer le PDR, de réduire la consommation énergétique ou d'augmenter la capacité du réseau.

Les approches simples utilisent souvent la distance à la passerelle pour attribuer les SF. Les nœuds proches utilisent des SF faibles, tandis que les nœuds éloignés utilisent des SF élevés. Cette méthode est facile à mettre en œuvre, mais elle ne tient pas toujours compte des obstacles urbains, du SNR réel ou de la charge réseau.

Des approches plus avancées utilisent des métriques telles que le RSSI, le SNR, le taux de perte de paquets ou l'historique de communication afin de choisir les paramètres radio de manière plus adaptée.

1.11.2 Optimisation du placement des passerelles

Le placement des passerelles est un problème central en environnement urbain dense. Une passerelle mal placée peut laisser de grandes zones non couvertes, tandis qu'un nombre excessif de passerelles augmente le coût du réseau sans forcément améliorer proportionnellement la performance.

Le problème de placement consiste à choisir les positions des passerelles afin de maximiser la couverture, améliorer le PDR, réduire les zones d'ombre et limiter les collisions. Ce problème peut être formulé comme un problème d'optimisation sous contraintes :

$$\max_{\mathcal{G}} C(\mathcal{G}) \quad \text{sous contraintes} \quad |\mathcal{G}| \leq G_{\max}, \quad (1.8)$$

où $\mathcal{G}$ représente l'ensemble des passerelles sélectionnées, $C(\mathcal{G})$ la couverture obtenue et $G_{\max}$ le nombre maximal de passerelles autorisé.

Dans un cadre plus complet, la fonction objectif peut intégrer plusieurs critères :

$$J = \alpha C + \beta PDR - \gamma E - \delta N_{\text{collisions}}, \quad (1.9)$$

où C représente la couverture, PDR la fiabilité, E la consommation énergétique, $N_{\text{collisions}}$ le nombre de collisions, et $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ sont des coefficients de pondération.

1.11.3 Réduction des collisions

La réduction des collisions peut être abordée par plusieurs stratégies :

- meilleure distribution des SF ;
- répartition des transmissions sur plusieurs canaux ;
- limitation du nombre de retransmissions ;
- adaptation de la période d'envoi des messages ;
- regroupement intelligent des nœuds ;
- ajout de passerelles dans les zones saturées.

Dans un réseau dense, la réduction des collisions est directement liée à la capacité du réseau. Il ne suffit pas d'améliorer la puissance reçue ; il faut également éviter que trop d'objets utilisent les mêmes ressources radio au même moment.

1.11.4 Stratégies basées sur l'intelligence artificielle

Des méthodes d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour améliorer l'optimisation LoRaWAN. Parmi les approches possibles, on trouve :

- la classification de la qualité de liaison à partir du RSSI, SNR et PDR ;
- la prédiction du meilleur SF ;
- l'estimation du risque de collision ;
- l'optimisation du placement des gateways par algorithmes métaheuristiques ;
- l'apprentissage de règles adaptatives à partir de données simulées ou réelles.

Dans notre cas, il est pertinent de privilégier des méthodes légères, interprétables et faciles à valider. Par exemple, une stratégie hybride peut combiner un modèle radio simplifié, des règles basées sur le SNR et une optimisation du placement des gateways.

1.12 Synthèse comparative des approches d'optimisation

Tab. 1.3 : Synthèse des principales approches d'optimisation LoRaWAN

Approche	Principe	Avantages	Limites	Intérêt pour l'optimisation
Attribution fixe des SF	SF choisi selon la distance à la gateway	Simple, facile à simuler	Ignore obstacles et charge réseau	Bon scénario de référence
ADR classique	Adaptation du SF et de la puissance selon la qualité de liaison	Réduit énergie et ToA pour les nœuds favorables	Moins adapté aux environnements très variables	Base importante à comparer
Optimisation de puissance	Réduction ou augmentation de P_t selon le lien radio	Réduit énergie et interférences	Peut dégrader les liens faibles	Pertinent pour compromis énergie-fiabilité
Placement optimal des gateways	Choix des positions maximisant la couverture	Améliore couverture et diversité spatiale	Dépend des données géographiques disponibles	Axe majeur de notre travail
Répartition canal/SF	Distribution des ressources radio entre nœuds	Réduit collisions et saturation	Complexité plus élevée	Utile pour réseau dense
Méthodes intelligentes	Règles, méta-heuristiques ou ML léger	Adaptation au contexte, amélioration multi-critère	Besoin de données et validation	Perspective avancée de notre travail

1.13 Positionnement de notre travail

À partir de l'état de l'art présenté, plusieurs constats peuvent être établis. Premièrement, LoRaWAN est bien adapté aux applications IoT urbaines à faible débit et faible consommation. Deuxièmement, ses performances en milieu urbain dense sont limitées par la propagation radio, les collisions, les interférences et les contraintes de duty cycle. Troisièmement, l'optimisation ne peut pas se limiter à un seul paramètre. Elle doit considérer conjointement le SF, la puissance d'émission, le placement des passerelles, la charge réseau et les métriques de performance.

Le présent travail se positionne donc autour de la problématique suivante : comment modéliser et optimiser un réseau LoRaWAN urbain dense afin d'améliorer simultanément la couverture, la fiabilité et la capacité, tout en respectant les contraintes énergétiques et réglementaires ?

Pour répondre à cette problématique, le travail proposé peut s'appuyer sur :

- un modèle radio simplifié intégrant path loss et shadowing ;
- des métriques telles que RSSI, SNR, PDR, ToA et énergie ;
- une comparaison entre réseau non optimisé et réseau optimisé ;
- une stratégie d'attribution des SF et de puissance ;
- une méthode de placement ou de sélection des gateways ;
- éventuellement une règle intelligente ou un algorithme léger d'aide à la décision.

L'originalité du travail ne réside pas seulement dans la description de LoRaWAN, mais dans l'analyse conjointe des paramètres radio, de la topologie réseau et des contraintes urbaines. Cette approche permet de construire une méthodologie cohérente pour améliorer les performances d'un réseau LoRaWAN dans un contexte réaliste de ville intelligente.

1.14 Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art complet sur les réseaux LoRaWAN en environnements urbains denses. Après avoir introduit l'IoT et les villes

intelligentes, nous avons présenté les réseaux LPWAN et montré l'intérêt de LoRaWAN pour les applications urbaines à faible consommation. La technologie LoRa, ses paramètres radio fondamentaux, l'architecture LoRaWAN, les classes de dispositifs et les contraintes réglementaires ont ensuite été détaillés. La Figure 1.9 résume le compromis multi-objectif de notre travail. L'optimisation d'un réseau LoRaWAN urbain dense doit améliorer la couverture et la fiabilité sans dégrader excessivement l'énergie consommée ni la capacité globale du réseau.

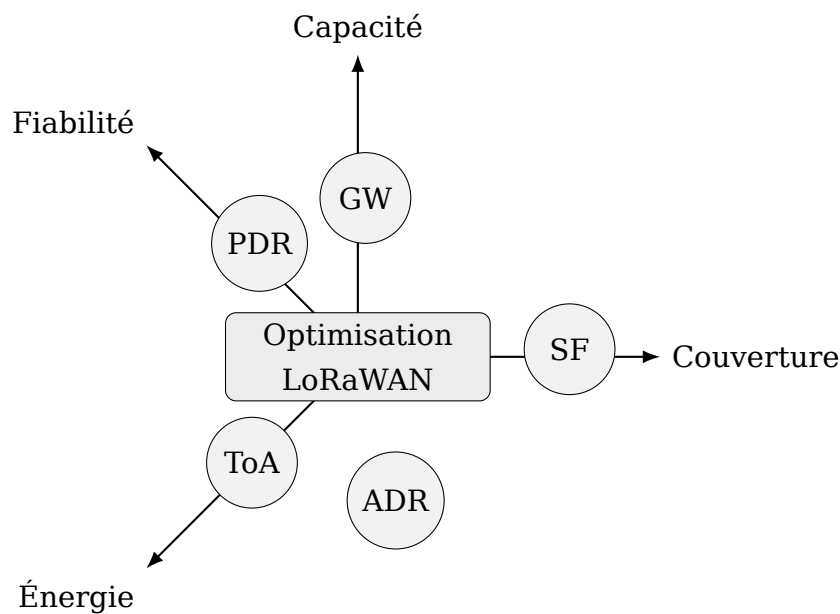


Fig. 1.9 : Compromis multi-objectif dans l'optimisation d'un réseau LoRaWAN urbain dense.

L'analyse a montré que les performances d'un réseau LoRaWAN urbain dépendent fortement de la propagation radio, du choix des paramètres LoRa, du placement des passerelles, du nombre de nœuds et de la gestion des collisions. Les métriques RSSI, SNR, PDR, ToA, consommation énergétique et capacité réseau constituent des indicateurs essentiels pour évaluer et comparer les scénarios de déploiement.

Enfin, l'état de l'art a mis en évidence l'importance des stratégies d'optimisation, notamment l'ADR, l'allocation des SF, l'ajustement de la puissance d'émission, la réduction des collisions et le placement optimal des gateways. Ces éléments serviront de base au chapitre suivant, consacré à la modélisation radio, aux métriques de performance et à la formulation du problème d'optimisation.

Chapitre 2

Modélisation radio et analyse de performance

2.1 Introduction

La couverture d'un réseau LoRaWAN en milieu urbain dense ne peut pas être évaluée uniquement à partir d'une distance géométrique entre un nœud et une passerelle. Deux objets placés à la même distance peuvent présenter des comportements très différents selon la présence d'immeubles, la hauteur de l'antenne, la nature des matériaux, l'orientation du module radio, l'encombrement électromagnétique et l'utilisation simultanée du canal par d'autres nœuds. Dans ce contexte, la modélisation radio joue un rôle essentiel : elle fournit un langage commun pour relier les mesures de terrain, les paramètres de transmission et les indicateurs de qualité de service.

Ce chapitre enrichit la base théorique nécessaire à l'optimisation présentée dans le chapitre 4. Il introduit les phénomènes de propagation, les modèles de perte de trajet, le bilan de liaison, les indicateurs RSSI/SNR/PDR et les compromis imposés par les paramètres LoRa. L'objectif n'est pas de construire un modèle parfait de la ville, ce qui nécessiterait une cartographie 3D et une campagne de mesures importante, mais de disposer d'une modélisation suffisamment robuste pour guider les décisions d'ingénierie. Les développements s'appuient sur les travaux de référence consacrés aux réseaux LPWAN et LoRaWAN [1, 2, 4, 5], ainsi que sur les spécifications LoRaWAN et les paramètres régionaux [3, 6].

2.2 Caractéristiques radio de LoRaWAN

2.2.1 Principe général de LoRa et LoRaWAN

LoRa désigne la couche physique fondée sur une modulation à étalement de spectre de type *chirp spread spectrum*. Cette modulation permet d'obtenir une grande sensibilité de réception et une bonne robustesse pour des puissances d'émission faibles. LoRaWAN définit, quant à lui, la couche MAC et l'architecture réseau permettant l'interconnexion des nœuds, des passerelles, du serveur réseau et du serveur applicatif [3, 7].

Dans une architecture typique, les nœuds transmettent des trames montantes qui peuvent être reçues par une ou plusieurs passerelles. Les passerelles ne décident pas du routage applicatif : elles relaient les trames vers le serveur réseau. Ce dernier réalise la déduplication, la gestion de sécurité, l'application de l'Adaptive Data Rate (ADR) et l'acheminement vers le serveur d'application. Cette organisation en étoile d'étoiles simplifie les objets terminaux, mais reporte l'intelligence d'optimisation vers l'infrastructure.

2.2.2 Paramètres radio principaux

Les paramètres radio les plus influents sont le facteur d'étalement SF , la bande passante BW , le taux de codage CR et la puissance d'émission P_{tx} . Le facteur d'étalement prend généralement des valeurs de 7 à 12. Un SF faible fournit un débit plus élevé et un temps d'occupation du canal plus court, tandis qu'un SF élevé améliore la portée au prix d'une durée de transmission plus longue [8, 4]. La bande passante, souvent fixée à 125 kHz dans les scénarios EU868, agit aussi sur le débit, la sensibilité et le temps de transmission [6].

Tab. 2.1 : Effet qualitatif des principaux paramètres LoRa sur les performances radio

Paramètre	Effet d'une augmentation	Risque associé
Facteur d'étalement SF	Améliore la sensibilité et la robustesse du lien	Augmente fortement le temps d'occupation du canal et l'énergie par paquet
Puissance P_{tx}	Améliore la puissance reçue et la marge radio	Augmente la consommation et peut accroître les interférences locales
Bande passante BW	Augmente le débit utile et réduit la durée symbole	Réduit la sensibilité du récepteur
Taux de codage CR	Renforce la correction d'erreur	Réduit le débit utile et augmente la durée de trame

2.3 Propagation radio en environnement urbain dense

2.3.1 Atténuation et perte de trajet

Lorsqu'une onde radio se propage, sa puissance diminue avec la distance. Dans le cas idéal d'un espace libre, sans obstacle et avec visibilité directe, la perte de trajet peut être calculée par :

$$PL_{FS}(dB) = 32.44 + 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d_{km}). \quad (2.1)$$

Cette expression fournit une référence utile, mais elle reste optimiste pour une ville dense. Les rues étroites, les façades, les véhicules, la végétation et les murs intérieurs introduisent des pertes supplémentaires. Les campagnes de mesures LoRaWAN réalisées en environnement urbain montrent que la variabilité du canal peut être importante et que le modèle doit intégrer une dispersion autour de la perte moyenne [9, 10].

2.3.2 Effet de masque, trajets multiples et non-ligne de vue

L'effet de masque correspond aux variations lentes de la puissance reçue causées par les obstacles. Il est souvent représenté par une variable aléatoire gaussienne en dB. Les trajets multiples proviennent des réflexions et diffractions sur les surfaces urbaines. Ils peuvent créer des fluctuations rapides du signal et expliquer pourquoi un lien peut s'améliorer ou se dégrader fortement sur quelques mètres seulement.

Dans un scénario LoRaWAN, ces phénomènes sont particulièrement importants car les nœuds sont souvent installés à faible hauteur, parfois dans des coffrets, des bâtiments ou des mobiliers urbains. La hauteur de la passerelle devient alors un paramètre décisif. Une passerelle placée en toiture peut améliorer la couverture, mais elle ne supprime pas totalement les zones d'ombre au niveau de la rue.

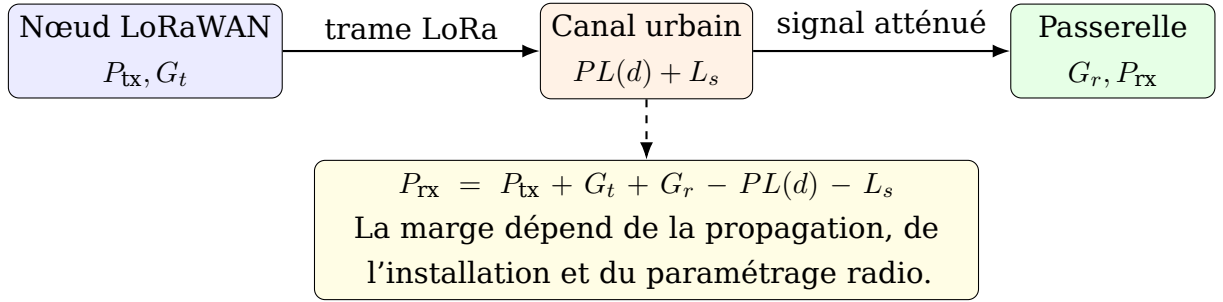


Fig. 2.1 : Bilan de liaison simplifié entre un nœud LoRaWAN et une passerelle.

2.4 Modèles de propagation utiles

2.4.1 Modèle log-distance

Le modèle log-distance est largement utilisé lorsque l'on souhaite relier une distance à une perte moyenne de trajet sans disposer d'un modèle géométrique complet de l'environnement :

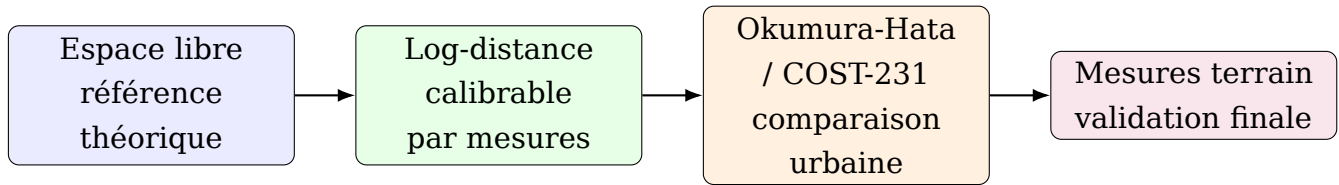
$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (2.2)$$

où d_0 est une distance de référence, n l'exposant de perte de trajet et X_σ le terme de shadowing. En milieu urbain, l'exposant n est généralement

supérieur à celui de l'espace libre, traduisant l'influence des obstacles et des propagations non directes [11, 12].

2.4.2 Modèles empiriques urbains

Les modèles empiriques tels qu'Okumura-Hata ou COST-231 ont été conçus pour représenter des pertes de propagation en environnement urbain et suburbain. Même s'ils ne sont pas toujours directement adaptés aux hauteurs d'antennes et aux fréquences propres à tous les déploiements LoRaWAN, ils donnent une lecture utile des facteurs dominants : fréquence, distance, hauteur d'antenne, type de zone et densité du bâti. Dans notre travail, ces modèles peuvent servir de référence pour justifier les tendances observées, tandis que les paramètres finaux doivent rester ajustés par mesure ou simulation.



Plus le modèle est proche du terrain, plus il devient utile pour dimensionner la couverture et ajuster les paramètres LoRaWAN.

Fig. 2.2 : Familles de modèles utilisables pour estimer la propagation en zone urbaine dense.

2.5 Bilan de liaison et sensibilité du récepteur

2.5.1 Puissance reçue

Le bilan de liaison relie la puissance émise à la puissance reçue :

$$P_{rx} = P_{tx} + G_t + G_r - PL(d) - L_s, \quad (2.3)$$

où G_t et G_r sont les gains d'antennes et L_s regroupe les pertes d'installation. La comparaison de P_{rx} à la sensibilité du récepteur permet d'estimer

si le lien peut être décodé.

2.5.2 Sensibilité et marge radio

La sensibilité dépend du bruit thermique, de la bande passante, du facteur de bruit du récepteur et du seuil minimal de SNR :

$$S_{\text{rx}} = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR_{\text{min}}(SF). \quad (2.4)$$

La marge de lien est alors :

$$M_{\text{link}} = P_{\text{rx}} - S_{\text{rx}}. \quad (2.5)$$

Une marge positive indique que le décodage est théoriquement possible. Cependant, en zone urbaine dense, une marge supplémentaire est nécessaire pour absorber le shadowing, les variations temporelles, l'orientation des antennes et les pertes d'installation.

2.6 Métriques de performance réseau

2.6.1 RSSI et SNR

Le RSSI représente la puissance totale reçue dans le canal. Il renseigne sur l'affaiblissement global du lien, mais il ne suffit pas à lui seul pour juger la qualité de démodulation. Le SNR exprime le rapport entre la puissance utile et le bruit. Pour LoRa, certains facteurs d'étalement permettent de décoder des signaux avec un SNR négatif, ce qui explique l'intérêt de combiner RSSI, SNR et PDR dans l'analyse [1, 7].

2.6.2 Packet Delivery Ratio

Le taux de livraison des paquets constitue l'indicateur de fiabilité le plus direct :

$$PDR = \frac{N_{\text{reçus}}}{N_{\text{émis}}} \times 100. \quad (2.6)$$

Il doit être interprété sur une fenêtre de mesure suffisamment longue. Un PDR élevé avec un SNR très faible peut signaler un lien fragile ; inversement, un bon SNR avec un PDR faible peut révéler des collisions, une mauvaise configuration ou un problème applicatif.

2.6.3 Temps d'occupation du canal et charge radio

Le temps d'occupation du canal, ou *Time on Air*, détermine la durée pendant laquelle une trame utilise la ressource radio. Il est fortement lié au facteur d'étalement :

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW}. \quad (2.7)$$

Lorsque SF augmente, T_{sym} augmente exponentiellement, ce qui réduit la capacité globale du réseau et accroît le risque de collisions. Cette contrainte est d'autant plus importante dans les bandes non licenciées, où les règles régionales imposent des limites d'utilisation du canal [13, 14].

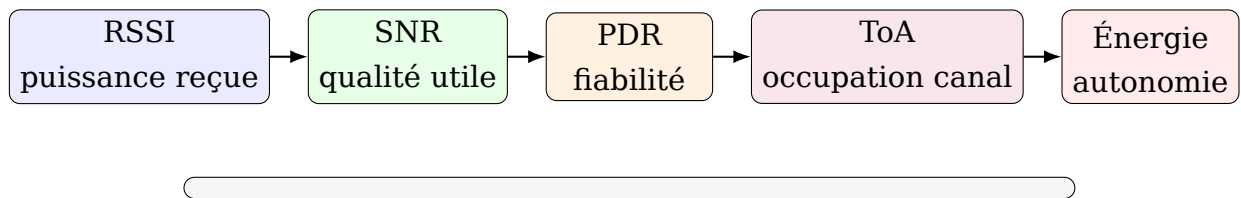


Fig. 2.3 : Indicateurs complémentaires pour l'analyse d'un lien LoRaWAN.

2.7 Compromis radio et logique d'optimisation

La modélisation précédente conduit à une conclusion importante : il n'existe pas de paramètre optimal unique pour tous les nœuds. Un nœud proche d'une passerelle doit utiliser un SF faible et une puissance limitée afin de réduire l'énergie et la charge radio. Un nœud éloigné ou masqué doit au contraire augmenter sa robustesse. L'optimisation consiste donc à attribuer la robustesse uniquement aux liens qui en ont réellement besoin.

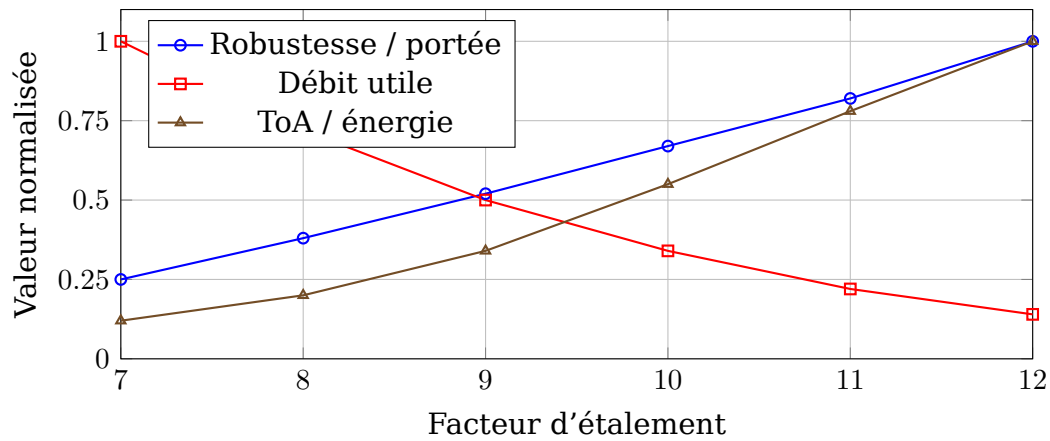


Fig. 2.4 : Compromis entre portée, temps de transmission, débit et consommation selon les paramètres LoRa.

En environnement urbain dense, augmenter la puissance ou le facteur d'étalement n'est pas toujours la meilleure solution. Une amélioration locale peut dégrader la capacité globale si elle augmente trop le temps d'occupation du canal. C'est pourquoi l'optimisation doit être multi-critère.

2.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases radio nécessaires à l'étude d'un réseau LoRaWAN urbain dense. Les modèles de propagation, le bilan de liaison et les métriques RSSI, SNR, PDR et Time on Air permettent de comprendre pourquoi une couverture correcte ne dépend pas d'un seul indicateur. Le facteur d'étalement, la puissance d'émission, la bande passante et la position des passerelles forment un ensemble de paramètres interdépendants. Le chapitre suivant décrit la méthodologie expérimentale utilisée pour collecter, organiser et exploiter ces informations en vue de l'optimisation.

Chapitre 3

Méthodologie expérimentale et constitution des données

3.1 Introduction

La qualité d'une étude d'optimisation LoRaWAN dépend directement de la qualité de la méthodologie expérimentale. Les modèles présentés dans le chapitre précédent permettent d'expliquer les tendances générales, mais ils doivent être confrontés à des mesures ou à des scénarios de simulation cohérents. En effet, dans une zone urbaine dense, les performances radio sont influencées par des facteurs qui ne sont pas toujours visibles dans les équations : obstacles, hauteur d'installation, orientation des antennes, densité des nœuds, collisions, duty cycle et conditions locales de bruit.

Ce chapitre présente une démarche complète pour constituer un jeu de données exploitable. Il décrit l'architecture expérimentale, les outils matériels et logiciels, les paramètres à mesurer, la structure des fichiers de données, le prétraitement et la méthode d'évaluation. L'objectif est de disposer d'une base reproductible permettant d'analyser les performances d'un réseau LoRaWAN et de préparer l'optimisation des paramètres radio.

3.2 Objectifs de l'expérimentation

L'expérimentation poursuit quatre objectifs complémentaires :

1. caractériser la qualité radio des liens à travers le RSSI, le SNR et le

taux de livraison des paquets ;

2. identifier les configurations qui améliorent la portée sans surcharger inutilement le canal ;
3. comparer plusieurs valeurs de SF , de puissance et de distance afin d'observer leur influence ;
4. fournir des données propres pour l'analyse, la validation et l'optimisation du chapitre 4.

La démarche retenue privilégie une vision pragmatique. Elle peut être appliquée à une campagne de mesures réelle, mais elle reste également compatible avec un scénario simulé lorsque l'accès au matériel ou au terrain est limité.

3.3 Architecture générale du système étudié

3.3.1 Principe de communication

Le système étudié repose sur une architecture LoRaWAN classique. Les nœuds IoT émettent des messages courts vers une ou plusieurs passerelles. Les passerelles transmettent ensuite les trames au serveur réseau, qui assure la déduplication, la sécurité, la gestion des paramètres et l'acheminement vers le serveur d'application. Les résultats sont enfin stockés dans une base de données ou dans des fichiers structurés pour l'analyse.

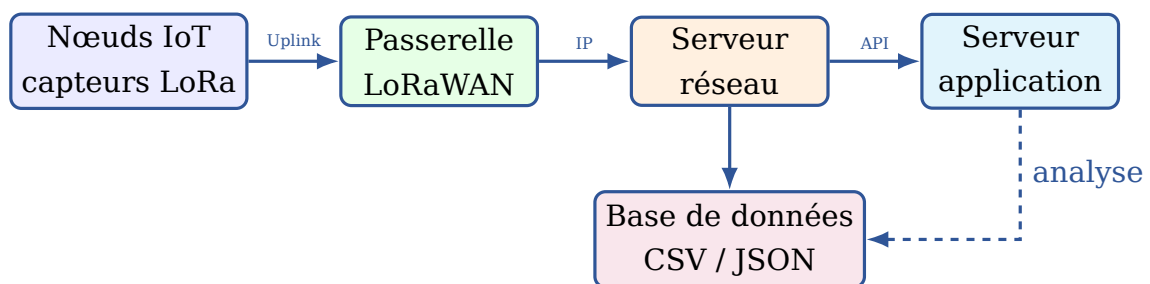


Fig. 3.1 : Architecture expérimentale retenue pour l'étude d'un réseau LoRaWAN urbain dense.

La Figure 3.1 montre que la passerelle ne réalise pas l'optimisation à elle seule. Elle joue principalement le rôle de relais radio. L'intelligence d'analyse est placée au niveau du serveur réseau ou de l'outil de traitement de

données, ce qui permet d'adapter les paramètres sans complexifier les nœuds terminaux.

3.3.2 Scénarios considérés

Pour représenter un environnement urbain dense, plusieurs scénarios doivent être considérés :

- une zone à visibilité partielle, avec quelques obstacles entre les nœuds et la passerelle ;
- une zone fortement masquée par des bâtiments ;
- une zone proche de la passerelle, permettant l'utilisation de SF faibles ;
- une zone limite de couverture, nécessitant des paramètres plus robustes ;
- un scénario de charge plus élevée, où plusieurs nœuds transmettent sur des fenêtres temporelles proches.

Cette diversité de scénarios permet d'éviter une conclusion trop spécifique à un seul point de mesure. Elle rend l'analyse plus représentative de la réalité d'une ville intelligente.

3.4 Matériel et outils utilisés

3.4.1 Équipements matériels

Le système peut être mis en œuvre avec des nœuds LoRa compatibles EU868, une ou plusieurs passerelles LoRaWAN, un ordinateur de supervision et une plateforme serveur. Lorsque le matériel n'est pas disponible, les mêmes paramètres peuvent être simulés à partir d'un modèle de propagation et de règles de réception.

Tab. 3.1 : Éléments matériels et rôle dans l'expérimentation

Élément	Rôle dans l'étude
Nœud LoRaWAN	Génération des messages IoT, mesure de terrain, variation des paramètres radio.
Passerelle LoRaWAN	Réception des trames, mesure RSSI/SNR, transfert vers le serveur réseau.
Serveur réseau	Déduplication, gestion des périphériques, collecte des métadonnées radio.
Ordinateur d'analyse	Nettoyage des données, calcul des indicateurs, génération des figures et tableaux.
Alimentation ou batterie	Évaluation indirecte de la consommation et de l'autonomie selon le temps d'émission.

3.4.2 Environnement logiciel

Les outils logiciels doivent assurer quatre fonctions : configuration, collecte, stockage et analyse. Les fichiers de sortie peuvent être au format CSV ou JSON. Python, MATLAB ou un notebook scientifique peuvent ensuite être utilisés pour calculer les métriques, tracer les courbes et appliquer la stratégie d'optimisation. Dans une démarche reproductible, chaque script doit être associé à une version de librairie et à un jeu de paramètres clairement documenté.

Tab. 3.2 : Outils logiciels recommandés pour une étude LoRaWAN reproductible

Outil	Utilisation principale
Interface serveur LoRaWAN	Déclaration des nœuds, récupération des métadonnées, suivi des trames.
CSV/JSON	Export des mesures brutes et des métadonnées de réception.
Python ou MATLAB	Prétraitement, calcul du PDR, des moyennes RSSI/SNR, des distributions et des graphiques.
Tableur	Vérification rapide des données et contrôle manuel de cohérence.
LaTeX	Production du mémoire, insertion des figures et traçabilité des résultats.

3.5 Plan expérimental

3.5.1 Variables contrôlées

Les variables contrôlées sont les paramètres que l'expérimentateur choisit volontairement. Elles incluent le facteur d'étalement, la bande passante, la puissance d'émission, la taille du message, la période d'envoi, la position du nœud et la hauteur d'antenne. Lorsque le réseau utilise l'ADR, il est recommandé de conserver une trace des paramètres effectivement appliqués, car ils peuvent changer au cours de la campagne.

3.5.2 Variables observées

Les variables observées sont mesurées ou calculées à partir des trames reçues : RSSI, SNR, passerelle de réception, horodatage, nombre de paquets transmis, nombre de paquets reçus, PDR, temps de transmission estimé et énergie estimée. L'analyse doit distinguer les données brutes et les indicateurs calculés.

Tab. 3.3 : Paramètres expérimentaux à renseigner pour chaque scénario

Paramètre	Description / valeur à renseigner
Fréquence	Bande régionale utilisée, par exemple EU868.
Spreading Factor	Valeurs testées : $SF7$ à $SF12$ selon le scénario.
Bande passante	Généralement 125 kHz, sauf scénario spécifique.
Puissance d'émission	Puissance configurée ou imposée par la réglementation locale.
Distance	Distance approximative nœud-passerelle et type d'environnement.
Nombre de paquets émis	Nombre total par configuration pour estimer correctement le PDR.
Période d'envoi	Intervalle entre deux transmissions successives.
Durée de l'expérience	Durée totale de collecte par point de mesure.

3.6 Chaîne de collecte et de traitement des données

3.6.1 Organisation générale

La Figure 3.2 présente la chaîne de traitement adoptée. Les mesures brutes sont d'abord exportées, puis nettoyées. Les indicateurs sont ensuite calculés par nœud, par zone et par configuration radio. Cette organisation permet de comparer les scénarios sans mélanger les effets de distance, de puissance et de facteur d'étalement.



Fig. 3.2 : Chaîne de collecte, nettoyage et exploitation des données expérimentales.

3.6.2 Structure minimale du jeu de données

Le jeu de données doit conserver les informations suffisantes pour recalculer les indicateurs. Une ligne peut correspondre à une trame émise ou à

une trame reçue. Les champs minimaux recommandés sont : l'identifiant du nœud, l'horodatage, le numéro de trame, le SF , la puissance d'émission, la bande passante, le RSSI, le SNR, la passerelle de réception, la distance et le statut reçu/perdu.

Tab. 3.4 : Structure recommandée d'un fichier de mesures LoRaWAN

Champ	Rôle dans l'analyse
node_id	Identifier le nœud et regrouper ses mesures.
timestamp	Reconstituer la chronologie et détecter les périodes instables.
frame_counter	Détecter les pertes de trames et calculer le PDR.
sf, bw, ptx	Associer chaque mesure à sa configuration radio.
rss_i, snr	Évaluer la qualité radio du lien.
gateway_id	Étudier la diversité spatiale de réception.
received	Distinguer les paquets reçus et les paquets considérés perdus.

3.6.3 Prétraitement

Le prétraitement comprend la suppression des doublons, la vérification des horodatages, l'identification des valeurs aberrantes et l'agrégation des mesures par fenêtre temporelle. Les valeurs extrêmes ne doivent pas être supprimées automatiquement sans justification : en radio, une valeur très faible de RSSI ou de SNR peut être une information importante sur une zone d'ombre.

3.7 Calcul des indicateurs

Pour chaque nœud i , le PDR est calculé sur une fenêtre de mesure :

$$PDR_i = \frac{N_{rx,i}}{N_{tx,i}} \times 100. \quad (3.1)$$

Le RSSI moyen et le SNR moyen sont calculés uniquement sur les paquets reçus :

$$\overline{RSSI}_i = \frac{1}{N_{rx,i}} \sum_{k=1}^{N_{rx,i}} RSSI_{i,k}, \quad \overline{SNR}_i = \frac{1}{N_{rx,i}} \sum_{k=1}^{N_{rx,i}} SNR_{i,k}. \quad (3.2)$$

Il est également possible de calculer l'écart-type afin de mesurer la stabilité du lien. Un lien avec un bon RSSI moyen mais une forte dispersion peut être moins fiable qu'un lien légèrement plus faible mais stable.

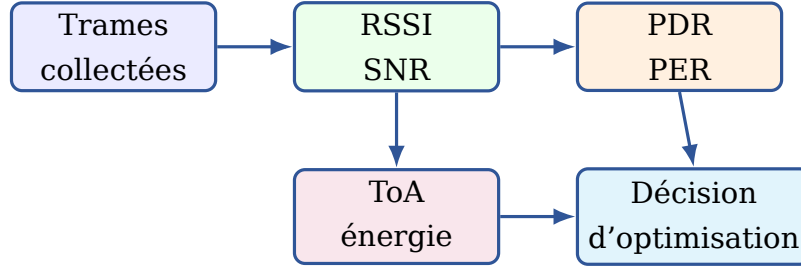


Fig. 3.3 : Indicateurs calculés à partir des trames collectées.

3.8 Méthode d'évaluation

L'évaluation repose sur la comparaison de plusieurs configurations radio. Chaque configuration doit être testée dans des conditions aussi proches que possible afin que la comparaison reste pertinente. Les résultats sont interprétés selon trois niveaux :

- **niveau lien** : qualité RSSI/SNR et marge de réception ;
- **niveau service** : PDR, stabilité et pertes de paquets ;
- **niveau réseau** : occupation du canal, énergie et capacité globale.

La méthode d'évaluation doit éviter de conclure uniquement sur une moyenne globale. Dans un réseau urbain dense, les nœuds en limite de couverture peuvent être peu nombreux mais critiques. Il est donc recommandé d'analyser également les valeurs minimales, les percentiles et les cartes de couverture.

3.9 Reproductibilité et limites

Pour garantir la reproductibilité, chaque figure du mémoire doit pouvoir être régénérée à partir des fichiers de mesures et des scripts fournis en

annexe. Les paramètres de simulation ou de mesure doivent être explicitement enregistrés. Les principales limites de l'approche sont liées à la taille du jeu de données, à la variabilité temporelle du canal, au nombre de passerelles disponibles et à la représentativité des points de mesure.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a défini la méthodologie expérimentale adoptée pour analyser un réseau LoRaWAN urbain dense. L'architecture, les variables contrôlées, les données collectées, le prétraitement et les indicateurs d'évaluation ont été présentés de manière structurée. Cette base méthodologique permet d'aborder le chapitre suivant, consacré à l'optimisation des paramètres radio et à l'interprétation des résultats.

Chapitre 4

Optimisation des paramètres radio et analyse des résultats

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont montré que les performances d'un réseau LoRaWAN urbain dense résultent d'un compromis entre couverture, fiabilité, capacité radio et autonomie énergétique. Dans une zone réelle, deux liens ayant un RSSI proche peuvent présenter des comportements différents selon le SNR, les collisions, la diversité de passerelles et la stabilité temporelle du canal. Il est donc insuffisant d'optimiser uniquement la puissance reçue ou la distance.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une stratégie d'optimisation interprétable des paramètres radio. L'approche retenue s'appuie sur les indicateurs mesurables présentés dans les chapitres précédents : RSSI, SNR, PDR, marge de lien, temps d'occupation du canal et énergie estimée. Elle ajuste principalement le facteur d'étalement SF et la puissance d'émission P_{tx} , tout en tenant compte du choix de passerelle et des contraintes réglementaires. Cette logique est proche des mécanismes d'ADR, mais elle est expliquée ici de manière pédagogique et adaptée à un travail de mémoire [15, 16, 17].

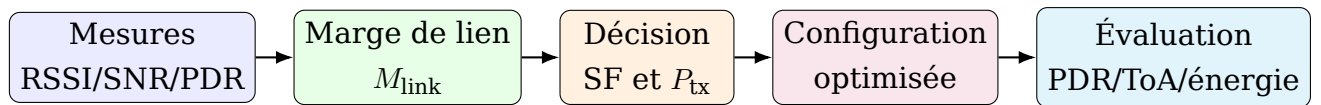


Fig. 4.1 : Chaîne générale d'optimisation des paramètres radio LoRaWAN en environnement urbain dense.

La Figure 4.1 résume la démarche. Les mesures brutes sont d’abord nettoyées et agrégées. Les indicateurs de lien sont ensuite calculés. Enfin, les paramètres sont adaptés selon une logique multi-critère afin d’améliorer la fiabilité sans gaspiller les ressources radio.

Afin de rendre cette analyse plus concrète, ce chapitre est enrichi par une simulation d’un réseau LPWAN dense. Cette simulation permet d’observer, à partir de graphes et de résultats numériques, l’effet de la densité de nœuds sur le taux de livraison des paquets, les pertes par collision et la charge temporelle offerte au canal.

4.2 Objectifs de l’optimisation

L’optimisation ne consiste pas à maximiser un seul indicateur. Elle doit rechercher un équilibre entre plusieurs objectifs :

- garantir un PDR suffisant pour les applications de supervision urbaine ;
- réduire le temps d’occupation du canal afin de limiter les collisions ;
- préserver l’autonomie des nœuds alimentés par batterie ;
- éviter les configurations trop robustes lorsque la marge radio est déjà élevée ;
- exploiter la diversité de réception offerte par plusieurs passerelles.

Cette approche est particulièrement importante en LoRaWAN, car une décision locale trop conservatrice peut dégrader le réseau global. Par exemple, augmenter le SF d’un grand nombre de nœuds améliore leur robustesse individuelle, mais augmente aussi leur temps d’émission, ce qui accroît la probabilité de collisions [4, 18].

4.3 Indicateurs utilisés pour la décision

4.3.1 Marge de lien

La marge de lien d’un nœud i vers une passerelle g est définie par :

$$M_{\text{link}}^{(i,g)} = P_{\text{rx}}^{(i,g)} - S_{\text{rx}}(SF_i, BW_i). \quad (4.1)$$

Une marge élevée signifie que le lien peut supporter une réduction de robustesse, par exemple une diminution du SF ou de la puissance. Une marge faible indique au contraire qu'une correction est nécessaire.

4.3.2 Fiabilité

La fiabilité est mesurée par le taux de livraison des paquets :

$$\widehat{PDR}_i = \frac{N_{rx,i}}{N_{tx,i}} \times 100. \quad (4.2)$$

Le PDR est l'indicateur le plus proche du besoin applicatif. Toutefois, il doit être interprété avec le RSSI et le SNR afin de distinguer une perte due à un lien faible d'une perte due à la collision ou à une saturation du canal.

4.3.3 Temps d'occupation du canal

Le temps symbole LoRa est donné par :

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW}. \quad (4.3)$$

Ainsi, l'augmentation du SF entraîne une augmentation rapide du temps d'occupation du canal. Pour une trame, on peut écrire :

$$T_{\text{air}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}}. \quad (4.4)$$

Cette grandeur influence directement la capacité du réseau, le risque de collision et l'énergie consommée par paquet.

4.3.4 Énergie par cycle

Pour un nœud alimenté par batterie, l'énergie consommée peut être approchée par :

$$E_{\text{cycle}} = V (I_{tx}T_{tx} + I_{rx}T_{rx} + I_{proc}T_{proc} + I_{sleep}T_{sleep}). \quad (4.5)$$

Même si ce modèle est simplifié, il montre clairement que la réduction du temps d'émission contribue à améliorer l'autonomie.

4.4 Formulation multi-objectif

Pour chaque nœud i , on cherche une configuration :

$$\mathbf{x}_i = [SF_i, P_{\text{tx},i}, BW_i, CR_i, c_i, g_i], \quad (4.6)$$

où c_i représente le canal et g_i la passerelle de référence pour l'analyse. Une fonction objectif peut être écrite sous forme normalisée :

$$\max_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = \alpha \overline{PDR} + \beta C_{\text{cov}} - \gamma \overline{E} - \delta \overline{T}_{\text{air}} - \eta R_{\text{coll}}, \quad (4.7)$$

avec C_{cov} la couverture estimée, $\overline{E}$ l'énergie moyenne, $\overline{T}_{\text{air}}$ le temps d'occupation moyen et R_{coll} un indicateur de risque de collision. Les contraintes principales sont :

$$SF_i \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}, \quad (4.8)$$

$$P_{\text{tx},\min} \leq P_{\text{tx},i} \leq P_{\text{tx},\max}, \quad (4.9)$$

$$\widehat{PDR}_i \geq PDR_{\min}, \quad (4.10)$$

$$M_{\text{link}}^{(i,g)} \geq M_{\min}, \quad (4.11)$$

$$\sum_i T_{\text{air},i} \leq T_{\text{canal},\max}. \quad (4.12)$$

4.5 Influence des paramètres radio

4.5.1 Effet du facteur d'étalement

Le facteur d'étalement est le paramètre le plus structurant. Un SF faible réduit le temps de transmission et l'énergie, mais il demande un lien de meilleure qualité. Un SF élevé augmente la robustesse, mais il occupe plus longtemps le canal. La Figure 4.2 illustre ce compromis.

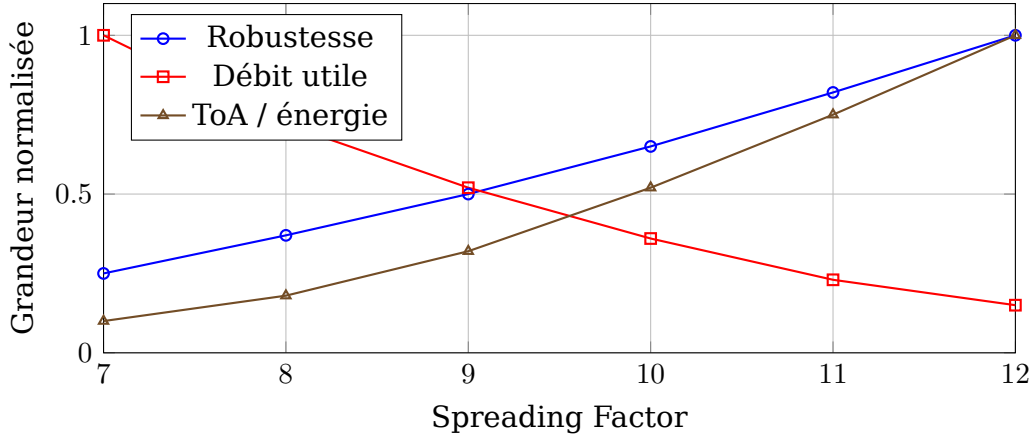


Fig. 4.2 : Compromis normalisé entre robustesse, débit utile et temps d'occupation du canal en fonction du facteur d'étalement.

4.5.2 Effet de la puissance d'émission

La puissance d'émission améliore la puissance reçue, mais elle augmente la consommation et peut accroître la charge radio. Une stratégie raisonnable consiste donc à utiliser la plus faible puissance compatible avec le PDR cible et la marge de sécurité. En pratique, il est préférable de réduire d'abord la puissance lorsqu'un lien présente une marge excessive, puis de réduire le SF si le lien reste stable.

4.5.3 Effet de la diversité de passerelles

Une même trame peut être reçue par plusieurs passerelles. Cette diversité spatiale améliore la robustesse dans les zones urbaines masquées. Pour l'analyse, la passerelle de référence peut être choisie selon :

$$g_i^* = \arg \max_{g \in \mathcal{G}} M_{\text{link}}^{(i,g)}. \quad (4.13)$$

Cette sélection ne remplace pas la déduplication effectuée par le serveur réseau, mais elle fournit une information utile pour comprendre quelle passerelle assure la meilleure marge pour un nœud donné.

4.6 Stratégie adaptative proposée

La stratégie proposée repose sur trois états de décision : renforcer, conserver ou alléger la configuration. Elle utilise deux seuils de marge $M_{\min}$ et

$M_{\max}$ afin d'éviter les oscillations. Lorsque la marge est inférieure au seuil bas ou que le PDR est insuffisant, la robustesse est augmentée. Lorsque la marge dépasse le seuil haut et que le PDR reste satisfaisant, le coût radio est réduit.

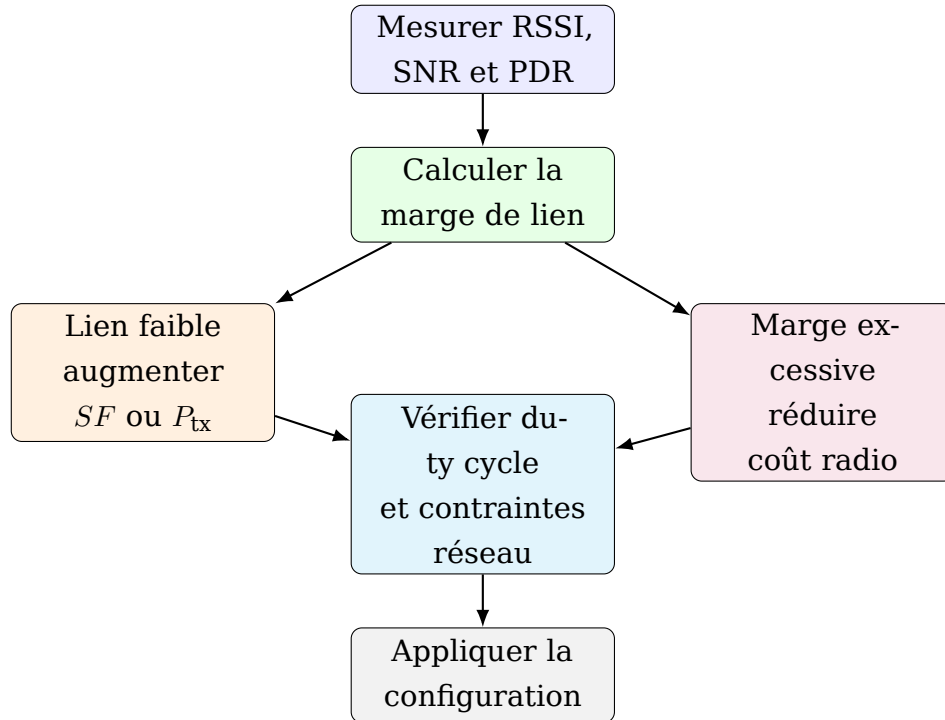


Fig. 4.3 : Organigramme de la stratégie adaptative proposée pour l'optimisation du SF et de la puissance d'émission.

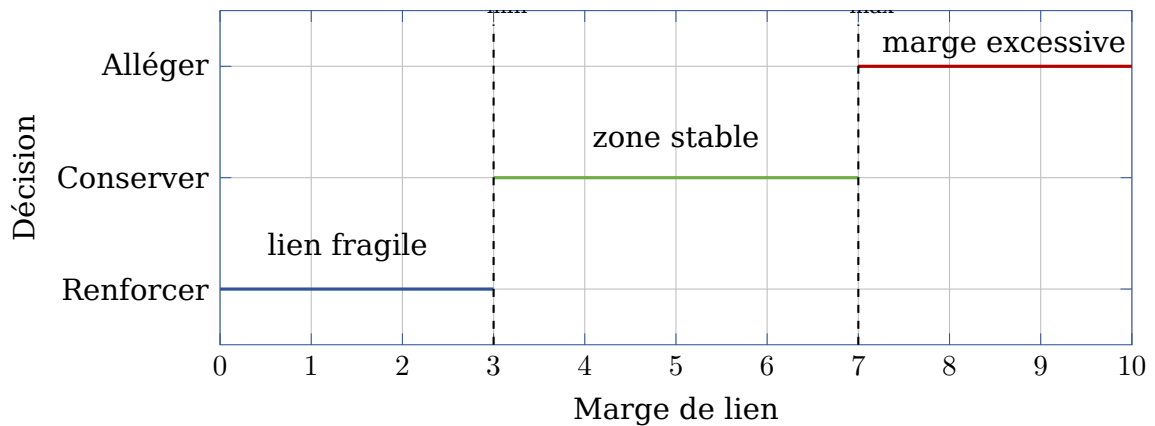


Fig. 4.4 : Principe d'hystérèse utilisé pour stabiliser la décision d'optimisation.

Algorithm 1 Optimisation adaptative des paramètres radio LoRaWAN

Require : Mesures $RSSI$, SNR , N_{tx} , N_{rx} , seuils PDR_{min} , M_{min} et M_{max}

Ensure : Configuration optimisée $\mathbf{x}_i^*$ pour chaque nœud i

```

1: for chaque nœud  $i$  do
2:   Calculer  $\widehat{PDR}_i$ ,  $\overline{RSSI}_i$  et  $\overline{SNR}_i$ 
3:   Sélectionner  $g_i^*$  selon la meilleure marge de lien
4:   Estimer  $M_{link}^{(i,g_i^*)}$  et  $T_{air,i}$ 
5:   if  $\widehat{PDR}_i < PDR_{min}$  ou  $M_{link} < M_{min}$  then
6:     Renforcer la configuration : augmenter  $SF$  si possible, sinon
       augmenter  $P_{tx}$ 
7:   else if  $\widehat{PDR}_i \geq PDR_{min}$  et  $M_{link} > M_{max}$  then
8:     Alléger la configuration : réduire  $P_{tx}$  ou réduire  $SF$  si possible
9:   else
10:    Conserver la configuration actuelle
11:   end if
12:   Vérifier les contraintes de puissance, de duty cycle et de charge
       du canal
13:   Enregistrer  $\mathbf{x}_i^*$ 
14: end for

```

4.7 Validation numérique de la démarche

4.7.1 Scénario de validation

En l'absence d'une campagne de terrain complète sur toute la zone urbaine, une validation numérique permet de vérifier la cohérence de l'approche. Le scénario considéré comporte des nœuds répartis dans une zone urbaine, deux passerelles et des transmissions périodiques de messages courts. Les pertes de trajet sont estimées avec un modèle log-distance et un terme de shadowing.

Tab. 4.1 : Paramètres utilisés pour la validation numérique

Paramètre	Valeur ou description
Technologie	LoRaWAN, bande sub-GHz de type EU868.
Bande passante	$BW = 125 \text{ kHz}$.
Facteurs d'étalement	$SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$.
Payload applicatif	Message court représentatif d'une mesure IoT urbaine.
Nombre de passerelles	Deux passerelles pour exploiter la diversité spatiale.
Critères d'évaluation	PDR, RSSI, SNR, marge, Time on Air, énergie et risque de collision.

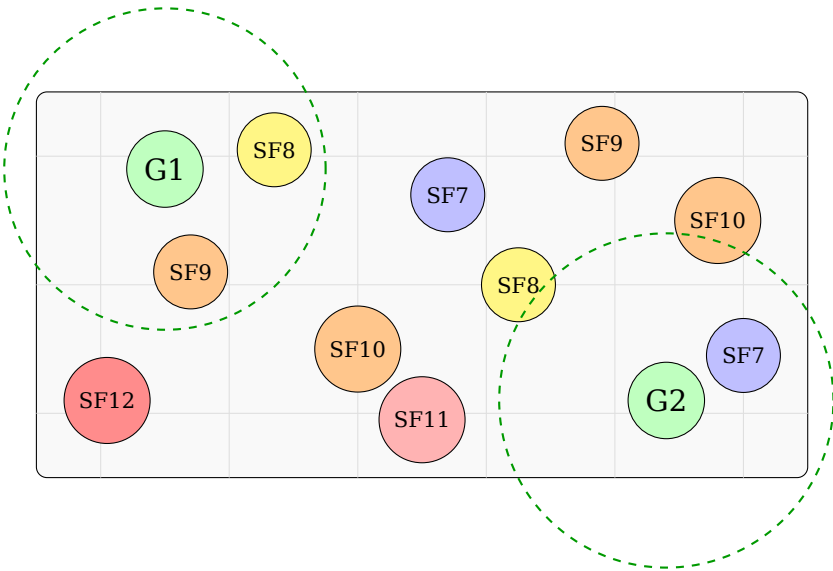


Fig. 4.5 : Exemple de carte de qualité de lien et d'attribution du facteur d'étalement selon la marge radio.

4.7.2 Répartition des facteurs d'étalement

La première conséquence attendue de l'optimisation est une meilleure répartition des facteurs d'étalement. Dans une configuration conservatrice, une proportion importante de nœuds utilise des SF élevés. Après optimisation, les nœuds disposant d'une bonne marge sont ramenés vers des SF plus faibles, ce qui réduit la durée moyenne des transmissions.

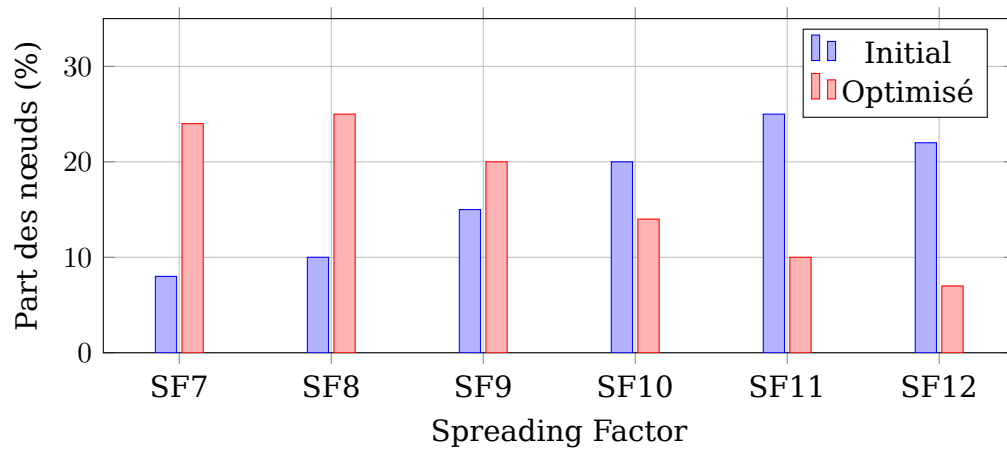


Fig. 4.6 : Exemple de redistribution des facteurs d'étalement après optimisation.

4.7.3 Comparaison globale

La comparaison entre configuration initiale et configuration optimisée doit être réalisée sur des indicateurs normalisés. Une valeur supérieure à 100 % est recherchée pour les indicateurs de qualité comme le PDR ou la couverture, tandis qu'une valeur inférieure à 100 % est recherchée pour les indicateurs de coût comme le Time on Air, l'énergie ou les collisions.

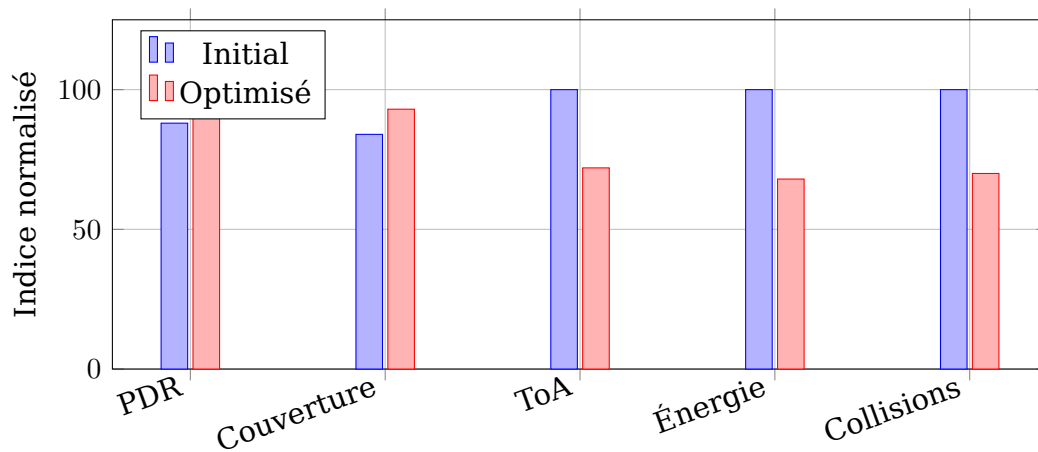


Fig. 4.7 : Comparaison normalisée entre configuration initiale et configuration optimisée.

Tab. 4.2 : Synthèse qualitative des effets attendus de l’optimisation

Critère	Avant optimisation	Après optimisation
Fiabilité	Paramètres fixes, parfois insuffisants en bord de couverture	Renforcement local des liens dégradés.
Temps d’occupation	Usage excessif des SF élevés	SF élevés réservés aux nœuds nécessaires.
Énergie	Puissance ou durée de transmission parfois excessives	Réduction progressive lorsque la marge est suffisante.
Capacité	Risque accru de collisions	Réduction de la charge temporelle du canal.

4.8 Simulation dense LPWAN et analyse des résultats

La stratégie d’optimisation présentée précédemment doit être vérifiée dans un contexte où le nombre d’objets connectés devient important. En effet, dans un réseau LoRaWAN, la dégradation ne provient pas uniquement de la couverture radio. Elle peut aussi provenir de la superposition temporelle des trames, de l’utilisation répétée des mêmes canaux et de l’emploi excessif des facteurs d’étalement élevés. Ces effets sont connus dans les travaux consacrés à la capacité et à la scalabilité de LoRaWAN [4, 18, 19].

Pour illustrer ce phénomène, une simulation simplifiée d’un réseau LPWAN dense de type LoRa/LoRaWAN a été intégrée au mémoire. Le but n’est pas de remplacer une campagne de mesures réelle, mais de fournir une lecture quantitative des tendances : évolution du Packet Delivery Ratio (PDR), croissance des pertes par collision et augmentation de la charge temporelle du canal lorsque la densité augmente.

4.8.1 Scénario de simulation

Le scénario considère une cellule circulaire de rayon $R = 2,5$ km contenant une passerelle placée au centre. Les nœuds IoT sont distribués aléa-

toirement dans la cellule et transmettent périodiquement des messages montants courts. Les facteurs d'étalement $SF7$ à $SF12$ sont attribués en fonction de la distance à la passerelle. Une collision est déclarée lorsque deux trames utilisent le même canal, le même facteur d'étalement et se recouvrent dans le temps. Un effet de capture simplifié est également pris en compte : si une trame est reçue avec une puissance supérieure d'au moins 6 dB à celle d'une trame concurrente, la trame la plus forte peut être décodée.

Tab. 4.3 : Paramètres principaux de la simulation LPWAN dense

Paramètre	Valeur utilisée
Technologie simulée	Uplink LoRa/LoRaWAN simplifié.
Rayon de cellule	$R = 2,5$ km.
Nombre de passerelles	Une passerelle placée au centre de la cellule.
Nombre de nœuds testés	100, 250, 500, 1000, 1500 et 2000 nœuds.
Canaux radio	868.1, 868.3 et 868,5 MHz.
Bande passante	$BW = 125$ kHz.
Facteurs d'étalement	$SF7$ à $SF12$.
Charge utile	20 octets.
Période moyenne d'émission	600 s.
Durée simulée	3600 s.
Puissance d'émission	14 dBm.
Modèle de propagation	Log-distance avec shadowing.
Seuil de capture	6 dB.

4.8.2 Topologie dense et répartition des facteurs d'étalement

La Figure 4.8 montre un exemple de topologie pour 1000 objets connectés. Les nœuds proches de la passerelle utilisent des facteurs d'étalement faibles, ce qui réduit leur temps d'antenne. Les nœuds plus éloignés utilisent des facteurs d'étalement plus élevés afin de conserver une marge de réception suffisante. Cette attribution est cohérente avec le fonctionnement général de LoRa, mais elle crée un compromis important : les nœuds éloignés occupent le canal plus longtemps et contribuent davantage au risque de collision [8, 7].

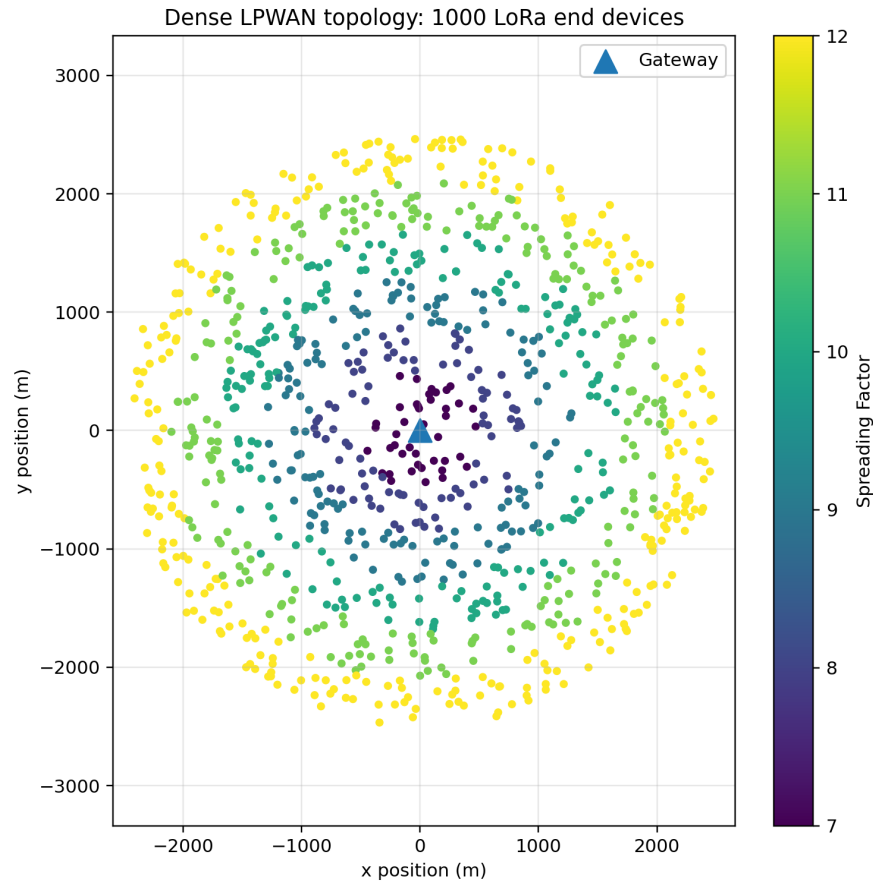


Fig. 4.8 : Topologie simulée d'un réseau LPWAN dense avec 1000 objets connectés.

La Figure 4.9 présente la distribution des facteurs d'étalement pour le cas à 1000 nœuds. Cette distribution montre que la densité ne doit pas être analysée uniquement à partir du nombre total d'objets. Deux réseaux ayant le même nombre de nœuds peuvent produire des charges radio différentes si la proportion de SF_{11} et SF_{12} varie. Dans un environnement urbain, une mauvaise couverture locale peut donc provoquer une charge temporelle disproportionnée, même si le volume applicatif transmis reste faible.

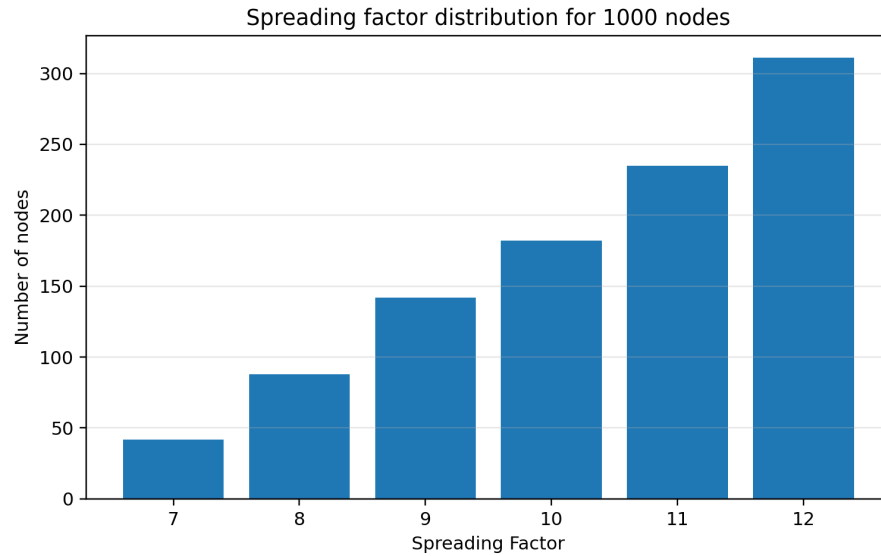


Fig. 4.9 : Distribution des facteurs d'étalement pour le scénario dense à 1000 nœuds.

4.8.3 Évolution du PDR avec la densité

Les résultats numériques sont synthétisés dans le Tableau 4.4. Lorsque le nombre de nœuds passe de 100 à 2000, le PDR diminue de 99.67 % à 75.70 %. Cette diminution est progressive mais significative. Elle confirme qu'un réseau LPWAN urbain dense peut rester fonctionnel à faible charge, puis se dégrader lorsque les transmissions deviennent trop nombreuses pour les canaux disponibles.

Tab. 4.4 : Résultats de simulation en fonction de la densité de nœuds

Nœuds	Paquets	Reçus	Pertes coll.	Pertes couv.	PDR (%)	Collisions (%)	Couverture (%)	Charge ToA (%)
100	600	598	2	0	99.67	0.33	0.00	3.82
250	1500	1428	72	0	95.20	4.80	0.00	9.13
500	3000	2785	215	0	92.83	7.17	0.00	18.40
1000	6000	5106	894	0	85.10	14.90	0.00	38.31
1500	9000	7157	1843	0	79.52	20.48	0.00	56.52
2000	12000	9084	2916	0	75.70	24.30	0.00	75.28

La Figure 4.10 illustre cette évolution. Pour 100 nœuds, le réseau fonctionne presque sans pertes. À 500 nœuds, le PDR reste encore supérieur à 92 %, mais les collisions commencent déjà à devenir visibles. À 1000 nœuds, le PDR tombe à 85.1 %, ce qui indique que le canal devient fortement sollicité. À 2000 nœuds, la fiabilité descend à 75.7 %, ce qui serait insuffisant pour des applications nécessitant une forte garantie de réception.

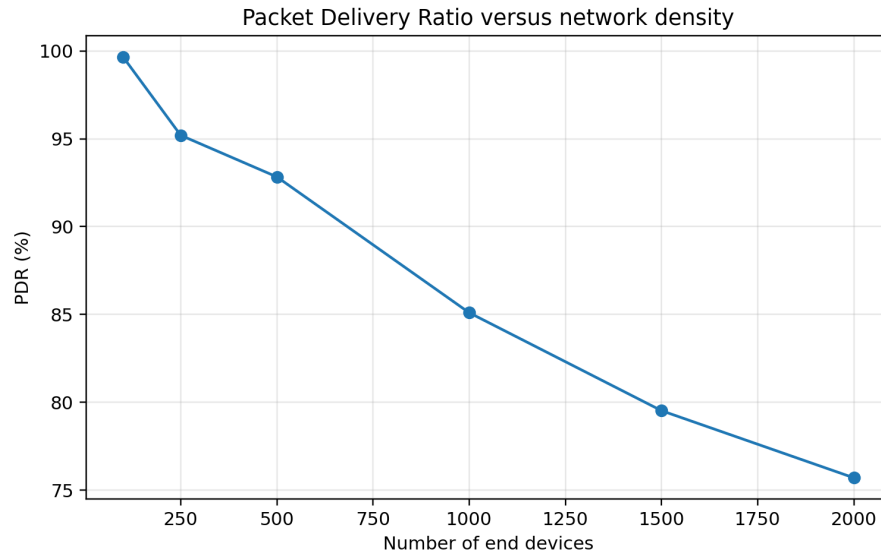


Fig. 4.10 : Évolution du Packet Delivery Ratio en fonction du nombre de nœuds.

4.8.4 Origine des pertes : collisions ou couverture

La Figure 4.11 permet de distinguer les pertes par collision des pertes de couverture. Dans le scénario considéré, les pertes de couverture sont nulles, car l'attribution du facteur d'étalement et la portée considérée permettent de maintenir une sensibilité suffisante. Les pertes observées proviennent donc essentiellement des collisions. Ce résultat est important : il montre que l'amélioration de la puissance d'émission ou l'augmentation systématique du SF ne résout pas toujours le problème. Lorsque le réseau est limité par la capacité, la solution doit plutôt chercher à réduire le temps d'occupation du canal, à répartir les transmissions ou à ajouter des passerelles.

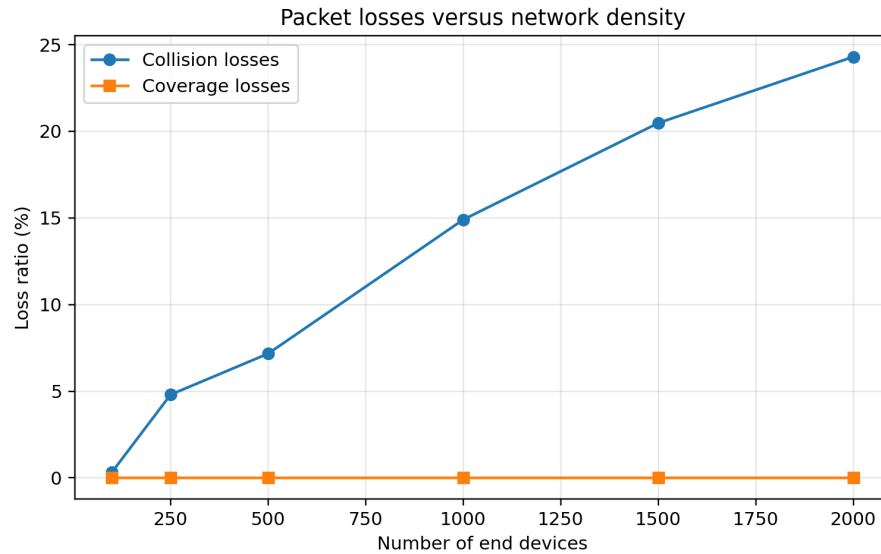


Fig. 4.11 : Évolution des pertes par collision et des pertes de couverture en fonction de la densité.

Le passage de 1000 à 2000 nœuds illustre très clairement cette limitation. Le nombre de paquets transmis double, de 6000 à 12000, mais le nombre de paquets perdus par collision passe de 894 à 2916. La proportion de pertes par collision augmente donc de 14.9 % à 24.3 %. Cela signifie que la densification du réseau ne produit pas seulement une augmentation linéaire des pertes ; elle accentue aussi les phénomènes de chevauchement temporel.

4.8.5 Charge temporelle offerte au canal

La Figure 4.12 présente l'occupation temporelle offerte au canal. Cette grandeur est directement reliée au Time on Air cumulé sur les trois canaux simulés. Elle passe de 3.82 % pour 100 nœuds à 75.28 % pour 2000 nœuds. Cette croissance explique la baisse du PDR : plus le canal est occupé, plus la probabilité de superposition entre trames augmente.

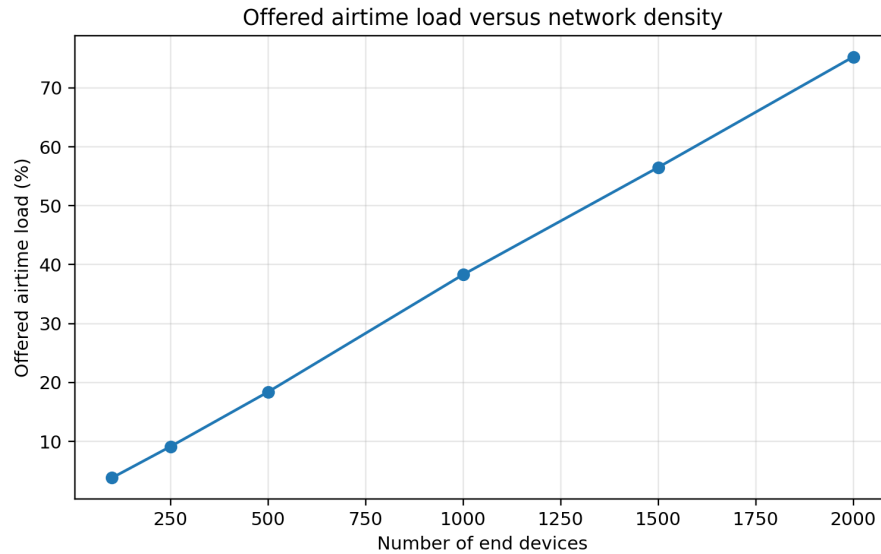


Fig. 4.12 : Occupation temporelle offerte du canal en fonction du nombre de nœuds.

Ces résultats renforcent la logique multi-objectif proposée dans ce chapitre. Une optimisation efficace ne doit pas seulement améliorer la marge radio individuelle ; elle doit aussi réduire la charge collective. Concrètement, cela signifie qu'il faut limiter l'usage des facteurs d'étalement élevés aux nœuds qui en ont réellement besoin, éviter les transmissions trop fréquentes, exploiter plusieurs canaux, répartir les objets sur plusieurs passerelles et utiliser l'ADR avec prudence [17, 16, 20].

4.8.6 Interprétation pour l'optimisation d'un réseau urbain dense

Les graphes de simulation conduisent à trois observations principales. Premièrement, lorsque la densité est faible, le réseau dispose d'une marge de capacité importante : l'optimisation peut alors viser surtout l'économie d'énergie et la réduction du SF . Deuxièmement, lorsque la densité devient moyenne, par exemple autour de 500 à 1000 nœuds dans le scénario étudié, la fiabilité reste acceptable mais les collisions deviennent suffisamment importantes pour imposer une stratégie de contrôle. Troisièmement, lorsque la charge approche des niveaux élevés, la limitation principale devient la capacité du canal ; une simple amélioration de puissance ne suffit plus.

Pour ce mémoire, le résultat le plus significatif est donc le suivant : dans un réseau LoRaWAN dense, la qualité d'un lien ne peut pas être évaluée

uniquement par le RSSI ou le SNR. Un nœud peut avoir une bonne couverture et malgré tout subir des pertes importantes à cause des collisions. La stratégie d'optimisation doit par conséquent combiner des indicateurs radio individuels avec des indicateurs globaux de charge et de densité.

4.9 Discussion

Les résultats attendus confirment que l'optimisation LoRaWAN est un problème multi-objectif. Une amélioration du lien radio peut être inutile si elle entraîne une surcharge du canal. À l'inverse, une réduction trop agressive de la puissance ou du SF peut économiser de l'énergie mais diminuer la fiabilité. La meilleure stratégie consiste donc à chercher une configuration minimale suffisante : suffisamment robuste pour assurer le service, mais pas plus coûteuse que nécessaire.

La méthode proposée présente plusieurs avantages. Elle est interprétable, car chaque décision est justifiée par un indicateur mesurable. Elle est progressive, car les paramètres changent par étapes. Elle est compatible avec une mise en œuvre serveur, ce qui évite d'ajouter une complexité importante aux nœuds IoT. Enfin, elle peut être enrichie ultérieurement par des méthodes d'apprentissage automatique légères, à condition de disposer d'un jeu de données plus large et suffisamment représentatif.

4.10 Limites et recommandations pratiques

La principale limite de l'approche est sa dépendance à la qualité des mesures. Si les mesures sont peu nombreuses, bruitées ou collectées sur une période trop courte, les décisions peuvent devenir instables. Il est donc recommandé d'utiliser une fenêtre d'observation suffisante, d'introduire une hystérèse entre les seuils et de vérifier régulièrement les performances après adaptation.

Tab. 4.5 : Recommandations pratiques pour un réseau LoRaWAN urbain dense

Recommandation	Justification
Éviter les configurations uniformes	Les conditions radio varient fortement d'un nœud à l'autre.
Utiliser le plus faible SF compatible avec le lien	Cela réduit le temps d'émission, l'énergie et les collisions.
Conserver une marge de sécurité	Le shadowing urbain peut provoquer une dégradation rapide du lien.
Exploiter plusieurs passerelles	La diversité spatiale améliore la robustesse et réduit les zones d'ombre.
Analyser plusieurs indicateurs	RSSI, SNR, PDR, ToA et énergie sont complémentaires.

4.11 Conclusion

Ce chapitre a proposé une méthodologie d'optimisation des paramètres LoRaWAN adaptée aux environnements urbains denses. L'analyse a montré que le choix du facteur d'étalement, de la puissance d'émission et de la passerelle de référence doit être fondé sur des indicateurs mesurables et complémentaires. La stratégie proposée renforce les liens dégradés et allège les liens disposant d'une marge suffisante. Elle améliore ainsi la fiabilité et la couverture tout en limitant l'occupation du canal et l'énergie consommée.

L'intégration de la simulation LPWAN dense a complété cette analyse par des résultats chiffrés. Dans le scénario étudié, le PDR diminue de 99.67 % à 75.70 % lorsque le nombre de nœuds passe de 100 à 2000, tandis que les pertes par collision augmentent de 0.33 % à 24.30 %. Les pertes de couverture étant nulles, la limitation observée est principalement liée à la capacité radio et au chevauchement temporel des trames. Ces résultats confirment que l'optimisation d'un réseau urbain dense doit traiter simultanément la qualité du lien et la charge collective du canal. Les perspectives portent sur une validation terrain plus large, la comparaison avec l'ADR classique, l'effet de plusieurs passerelles et l'intégration de modèles prédictifs légers.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'optimisation des réseaux LoRaWAN pour la couverture urbaine dense. Le travail réalisé a permis de montrer que les performances d'un tel réseau ne dépendent pas seulement de la portée radio, mais d'un ensemble de facteurs interdépendants : propagation en milieu urbain, facteur d'étalement, puissance d'émission, bande passante, taux de livraison des paquets, occupation du canal et consommation énergétique.

Le premier chapitre a présenté le contexte des réseaux IoT et l'intérêt des technologies LPWAN pour les applications de ville intelligente. Il a permis de replacer LoRaWAN dans une problématique de déploiement réel, où la simplicité, la faible consommation et la couverture longue distance doivent être mises en balance avec les contraintes du spectre non licencié et de la densité des objets connectés. Le deuxième chapitre a ensuite approfondi la modélisation radio et les métriques de performance. Cette étape a été essentielle pour comprendre le rôle du RSSI, du SNR, du PDR, du temps d'occupation du canal et de la marge de lien dans l'évaluation d'une configuration radio.

La méthodologie expérimentale proposée dans le troisième chapitre a défini les éléments nécessaires à la collecte et à l'exploitation des mesures. Enfin, le quatrième chapitre a introduit une démarche d'optimisation progressive des paramètres radio. Cette démarche repose sur l'idée qu'un bon réglage ne consiste pas à utiliser systématiquement la configuration la plus robuste, mais à choisir la configuration la plus efficace compatible avec la fiabilité exigée. Ainsi, les nœuds ayant une bonne marge radio peuvent utiliser des paramètres moins coûteux, tandis que les nœuds situés dans des zones difficiles peuvent conserver une configuration plus robuste.

L'analyse met en évidence l'intérêt d'une optimisation multi-critère. L'amélioration du PDR ne doit pas être obtenue au prix d'une augmentation excessive du temps d'émission ou de la consommation énergétique. De

même, la réduction de l'énergie ne doit pas dégrader la fiabilité de service. La simulation dense intégrée au chapitre 4 confirme cette idée : lorsque le nombre de nœuds augmente de 100 à 2000 dans le scénario étudié, le PDR diminue de 99.67 % à 75.70 % et les pertes par collision passent de 0.33 % à 24.30 %. La stratégie proposée constitue donc une base cohérente pour guider l'adaptation des paramètres LoRaWAN dans un environnement urbain dense.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Une première extension consiste à valider la méthodologie par une campagne de mesures réelle sur une zone urbaine représentative. Une deuxième perspective est la comparaison systématique avec l'ADR classique de LoRaWAN afin de quantifier les gains obtenus. Enfin, l'intégration de modèles d'apprentissage automatique légers pourrait permettre de prédire plus efficacement le couple optimal (SF, P_{tx}) en fonction de l'historique radio, de la position des nœuds et de l'état de charge du réseau.

Bibliographie

- [1] Aloÿs Augustin et al. «A Study of LoRa : Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things». In : *Sensors* 16.9 (2016), p. 1466. doi : [10.3390/s16091466](https://doi.org/10.3390/s16091466).
- [2] Marco Centenaro et al. «Long-Range Communications in Unlicensed Bands : The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios». In : *IEEE Wireless Communications* 23.5 (2016), p. 60-67. doi : [10.1109/MWC.2016.7721743](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743).
- [3] LoRa Alliance. *LoRaWAN L2 1.0.4 Specification*. <https://resources.lora-alliance.org/document/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>. Technical Specification. 2023.
- [4] Ferran Adelantado et al. «Understanding the Limits of LoRaWAN». In : *IEEE Communications Magazine* 55.9 (2017), p. 34-40. doi : [10.1109/MCOM.2017.1600613](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613).
- [5] Kais Mekki et al. «A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment». In : *ICT Express* 5.1 (2019), p. 1-7. doi : [10.1016/j.icte.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005).
- [6] LoRa Alliance. *RP002-1.0.4 LoRaWAN Regional Parameters*. <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>. Regional Parameters Specification. 2023.
- [7] Semtech Corporation. *LoRa Modem Design Guide*. Application note. Reference document for LoRa modulation and receiver sensitivity. 2013.
- [8] Martin Bor, John Vidler et Utz Roedig. «LoRa for the Internet of Things». In : *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. 2016, p. 361-366.
- [9] Paul J. Basford et al. «LoRaWAN for Smart City IoT Deployments : A Long Term Evaluation». In : *Sensors* 20.3 (2020), p. 648. doi : [10.3390/s20030648](https://doi.org/10.3390/s20030648).

- [10] Mauricio González-Palacio et al. « LoRaWAN Path Loss Measurements in an Urban Scenario Data Descriptor ». In : *Data* 8.1 (2023), p. 4. doi : [10.3390/data8010004](https://doi.org/10.3390/data8010004).
- [11] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications : Principles and Practice*. 2^e éd. Prentice Hall, 2002.
- [12] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [13] The Things Network. *EU863-870 MHz Band and Duty Cycle*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/eu868/>. Accessed online. 2024.
- [14] ETSI. *ETSI EN 300 220-2 V3.3.1: Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz*. Rapp. tech. European Telecommunications Standards Institute, 2025. url : https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.03.01_60/en_30022002v030301p.pdf.
- [15] Rodwell Kufakunesu, Gerhard P. Hancke et Adnan M. Abu-Mahfouz. « A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN : Recent Solutions and Major Challenges ». In : *Sensors* 20.18 (2020), p. 5044. doi : [10.3390/s20185044](https://doi.org/10.3390/s20185044).
- [16] Ahmed Farhad, Doo-Seop Kim et Jae-Young Pyun. « Resource Allocation to Massive Internet of Things in LoRaWANs ». In : *Sensors* 20.9 (2020), p. 2645. doi : [10.3390/s20092645](https://doi.org/10.3390/s20092645).
- [17] The Things Network. *Adaptive Data Rate*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adaptive-data-rate/>. Consulté le 7 mai 2026. 2026.
- [18] Orestis Georgiou et Usman Raza. « Low Power Wide Area Network Analysis : Can LoRa Scale ? » In : *IEEE Wireless Communications Letters* 6.2 (2017), p. 162-165. doi : [10.1109/LWC.2016.2647247](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247).
- [19] Konstantin Mikhaylov, Juha Petajajarvi et Tuomo Haenninen. « Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology ». In : *Proceedings of European Wireless* (2017).
- [20] Brecht Reynders, Wannes Meert et Sofie Pollin. « Power and Spreading Factor Control in Low Power Wide Area Networks ». In : *IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2017), p. 1-6. doi : [10.1109/ICC.2017.7996380](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996380).