

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

OPTIMISATION DE L'IRSA POUR LORAWAN : UNE APPROCHE BASÉE SUR LES
FACTEURS D'ÉTALEMENT ET LE DÉCODAGE SPATIO-TEMPOREL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR

NADJIB BENSERIR

MARS 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes chers parents, M. Abdelkader Benserir et Mme Fatima Graine, pour leur soutien inconditionnel, leur patience, leur bienveillance, tout au long de mon parcours universitaire. J'adresse également mes sincères remerciements à mon frère Toufik, à mes sœurs Asma et Rafika, ainsi qu'à Mme Halima et Mme Azed, dont la présence et les encouragements m'ont été d'un grand réconfort. Une pensée affectueuse à mon neveu Moncif et à ma nièce Chem, dont l'innocence et la joie de vivre ont souvent illuminé mes journées et nourri ma motivation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma professeure Halima Elbiaze pour son soutien financier, son accompagnement académique et sa confiance tout au long de ce travail. Son dévouement, ses conseils avisés et sa vision éclairée ont été une source précieuse de motivation et d'épanouissement intellectuel.

Je remercie également mon professeur Essaid Sabir pour son encadrement remarquable. Sa clairvoyance scientifique, sa disponibilité et ses conseils pertinents ont été essentiels à la réussite de ce projet.

Mes sincères remerciements vont aussi à Yaya Etaibi, ainsi qu'aux professeurs Elmahdi Driouch et Zakaria El Alaoui Ismaili pour leurs précieux conseils et leur aide.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mes collègues Radia, Ndeye Fatou, Lokmane, Housseem, Mohamed, Ratna, Rania, Cirine, Gael, Anes, Samira et Meriem, pour leur soutien et leur bienveillance tout au long de cette période.

Enfin, un très grand merci à mon frère Toufik pour son soutien indéfectible tout au long de ma vie, et en particulier pour son appui financier durant mes années d'études. Sa générosité et sa présence ont été d'un immense réconfort.

Merci infiniment à vous tous.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	ix
RÉSUMÉ	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Motivations	1
1.3 Problématique	2
1.4 Objectifs.....	4
1.5 Méthodologie.....	5
1.6 Contributions	6
1.7 Organisation du mémoire	7
CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Réseaux étendus à faible puissance.....	9
2.2.1 Principales caractéristiques des réseaux LPWAN	10
2.2.2 Technologies LPWAN	12
2.3 Spécifications du LoRaWAN.....	15
2.3.1 Architecture du réseau	15
2.3.2 Couche physique.....	17
2.3.3 Couche MAC	25

2.4	Comparaison	28
2.5	Protocoles d'accès aléatoire	29
2.5.1	Protocole ALOHA	30
2.5.2	Protocole ALOHA discrétisé.....	31
2.5.3	Protocole ALOHA discrétisé à répétition irrégulière.....	33
2.6	Conclusion	40
CHAPITRE 3 ÉTAT DE L'ART		42
3.1	Introduction.....	42
3.2	Méthodes et approches développées pour les améliorations de l'IRSA.....	42
3.2.1	Améliorations basées sur le décodage multi-paquets et la gestion de la puissance	42
3.2.2	Améliorations proposées pour l'analyse de l'aspect énergétique et de l'âge d'information	45
3.3	Conclusion	48
CHAPITRE 4 LE PROTOCOLE SF-IRSA BASÉ SUR LE DÉCODAGE SPATIO-TEMPOREL		49
4.1	Introduction.....	49
4.2	Modèle du système	49
4.3	Processus de décodage	51
4.4	Étude analytique	52
4.5	Efficacité énergétique	59
4.6	Conclusion	62
CHAPITRE 5 ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS		64

5.1	Introduction.....	64
5.2	Exploration des différentes probabilités de distribution.....	64
5.3	Résultats et discussion	65
5.4	Conclusion	74
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS		75
RÉFÉRENCES		78

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Comparaison des technologies sans fil selon différentes métriques de performance.....	10
Figure 2.2	Modes d'opération pour NB-IoT.....	14
Figure 2.3	Architecture d'un réseau LoRaWAN.	16
Figure 2.4	Pile protocolaire de LoRaWAN.	18
Figure 2.5	Perte de propagation en fonction de la distance pour deux scénarios : rural et urbain.....	20
Figure 2.6	Représentation du signal <i>chirp</i> dans la modulation LoRa.	21
Figure 2.7	Débit de données R en fonction du SF pour différents CR avec $BW = 125$ kHz.....	22
Figure 2.8	Structure d'un paquet LoRa (couche physique).....	23
Figure 2.9	Temps de transmission T_p en fonction du SF pour différents CR avec $BW = 125$ kHz.	25
Figure 2.10	Principe de fonctionnement de la classe A.	26
Figure 2.11	Principe de fonctionnement de la classe B.	27
Figure 2.12	Principe de fonctionnement de la classe C.	28
Figure 2.13	Transmission des équipements IoT avec ALOHA.	30
Figure 2.14	Transmission des équipements IoT avec ALOHA discrétisé.	32
Figure 2.15	Débit mesuré des protocoles ALOHA et SA.	32
Figure 2.16	Graphe biparti \mathbb{G} , où les arêtes modélisent les copies transmises par les nœuds équipements (NEs) et reçues par les nœuds slots (NSs).	33
Figure 2.17	Processus de décodage SIC.....	35

Figure 2.18	Représentation graphique des probabilités q et p pour IRSA.....	38
Figure 4.1	Modèle LoRa basé sur l'IRSA, où chaque SF est représenté par un graphe bipartite.	50
Figure 4.2	Représentation graphique du processus de décodage SF-IRSA-SIC.	53
Figure 4.3	Représentation graphique des probabilités q et p pour SF-IRSA.....	57
Figure 5.1	Portée maximale des SFs dans un réseau LoRaWAN.	66
Figure 5.2	Probabilité de succès sous différents schémas en fonction du M.....	67
Figure 5.3	Comparaison des performances en termes de taux de perte de paquets.	69
Figure 5.4	Comparaison des performances en termes de débit.....	70
Figure 5.5	Comparaison de performances en termes d'efficacité énergétique.	72

LISTE DES TABLEAUX

Table 2.1	Comparaison des technologies LPWAN : Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT.....	29
Table 2.2	Exemples de distributions $\Lambda(x)$ et des valeurs de la charge maximale G^* associées.	41
Table 4.1	Exemple des partitions possibles de $\ell = 3$ copies sur 3 SFs disponibles.	55
Table 4.2	Marge SIR entre le signal désiré et le signal interférant.....	60
Table 5.1	Trafic offert maximal G^* sous différentes distributions.	65
Table 5.2	Paramètres de simulation pour l'efficacité énergétique.	72
Table 5.3	Différentes distributions utilisées pour les simulations de η_{EE}	73

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET NOTATIONS

\in Appartient à.

\forall Pour tout.

Σ Symbole de sommation.

\neq Différent de.

\approx Approximativement.

∞ Infini.

$<$ Inférieur à.

\triangleq Défini comme égal.

5G *Cinquième génération.*

6G *Sixième génération.*

AES *Advanced Encryption Standard* (Standard de chiffrement avancé).

ADR *Adaptive Data Rate* (Débit de données adaptatif).

CAPEX *Capital Expenditure* (Dépenses d'investissement).

CRC *Cyclic Redundancy Check* (Contrôle de redondance cyclique).

CRDSA *Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA* (ALOHA discrétisé à diversité et à résolution de contention).

CSS *Chirp Spread Spectrum* (Chirp à spectre étalé).

dBm *decibel-milliwatts* (décibel-milliwatts).

D-BPSK *Differential Binary Phase-Shift Keying* (Modulation différentielle par déplacement de phase bivalente).

eDRX *extended Discontinuous Reception* (Mode de réception discontinue étendu).

FEC *Forward Error Correction* (Correction d'erreur en avant).

GFSK *Gaussian Frequency-Shift Keying* (Modulation par déplacement de fréquence gaussien).

GHz Gigahertz.

GSM *Global System for Mobile Communications* (Système global de communications avec mobiles).

Hz Hertz.

IoT *Internet of Things* (Internet des objets).

IRSA *Irregular Repetition Slotted ALOHA* (ALOHA discrétisé à répétition irrégulière).

ISM *Industrial, Scientific, and Medical* (Industriel, scientifique et médical).

km *kilometer* (kilomètre).

LPWAN *Low-Power Wide-Area Network* (Réseau étendu à faible puissance).

LTE *Long Term Evolution* (Évolution à long terme).

MAC *Medium Access Control* (Contrôle d'accès au support).

MHz *Megahertz* (Mégahertz).

ms millisecondes.

OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (Accès multiple par répartition orthogonale de fréquence).

OPEX *Operational Expenditure* (Dépenses d'exploitation).

PHY *Physical Layer* (Couche physique).

PSM *Power Saving Mode* (Mode d'économie d'énergie).

SA *Slotted ALOHA* (ALOHA discrétisé).

SC-OFDMA *Single Carrier Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (Accès multiple par répartition orthogonale de fréquence monoporteuse).

SF *Spreading Factor* (Facteur d'étalement).

SIC *Successive Interference Cancellation* (Annulation successive d'interférences).

RÉSUMÉ

Le développement rapide de l'internet des objets (en anglais, *internet of things* ou IoT) a créé un besoin croissant de réseaux à longue portée, économes en énergie et adaptés aux équipements de faible puissance. Les réseaux étendus à faible puissance (en anglais, *low-power wide-area networks* ou LPWAN) répondent à cette demande en offrant des solutions adaptées aux applications IoT nécessitant une large couverture et une faible consommation énergétique. Parmi ces solutions, LoRaWAN se démarque par sa capacité à connecter un grand nombre d'équipements sur de longues distances, tout en maintenant une faible consommation énergétique.

Bien que LoRaWAN soit largement utilisé pour l'accès sans fil à longue portée, son protocole d'accès aléatoire, ALOHA, montre ses limites dans les réseaux denses. Avec ce protocole, chaque équipement envoie une seule copie de ses données dans une trame en utilisant un facteur d'étalement (en anglais, *spreading factor* ou SF) spécifique, ce qui entraîne des taux de perte élevés et réduisant ainsi les performances du réseau. Pour améliorer les performances, des solutions comme le protocole ALOHA discrétisé à diversité et à résolution de contention (en anglais, *contention resolution diversity slotted Aloha* ou CRDSA) et ALOHA discrétisé à répétition irrégulière (en anglais, *irregular repetition slotted Aloha* ou IRSA) ont été développées. Ces protocoles augmentent les chances de transmission réussie en introduisant des répétitions de données envoyées par les équipements et en utilisant des techniques de décodage avancées. Contrairement à CRDSA, où chaque équipement envoie un nombre fixe de copies, IRSA va plus loin en intégrant des répétitions irrégulières, offrant ainsi une fiabilité supérieure. Cependant, IRSA n'exploite toujours pas pleinement les propriétés uniques des SFs propres à LoRaWAN. Dans ce mémoire, nous développons une nouvelle approche, appelée SF-IRSA, qui adapte IRSA aux spécificités de LoRaWAN en permettant aux équipements de transmettre une ou plusieurs copies d'un paquet en utilisant différents SFs. Cette approche exploite les SFs pour réduire les taux de perte de paquets et optimiser l'efficacité du réseau. Elle permet au décodeur d'appliquer un processus de décodage à deux dimensions : la dimension temporelle, pour décoder les paquets envoyés sur le même SF, et la dimension spatiale, pour décoder les paquets transmis sur différents SFs. En tirant parti de ces deux dimensions, le système offre un décodage plus robuste et performant. Nous présentons également un aperçu des réseaux LPWAN et des technologies associées. Ce mémoire inclut une revue de la littérature couvrant les concepts clés de notre étude, ainsi qu'une explication détaillée de l'approche proposée. Notre analyse théorique et nos simulations montrent que SF-IRSA surpasse les protocoles CRDSA et IRSA en termes de débit et de fiabilité. En détail, l'utilisation de deux SFs permet une augmentation de 16,2 % du débit asymptotique par rapport à IRSA standard. Avec trois SFs, le gain atteint 116,9 %, et avec six SFs, il augmente de 224,52 %.

Mots clés : LoRaWAN, facteur d'étalement, protocole IRSA, annulation successive d'interférences, réseau LPWAN, internet des objets.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

L’IoT connaît une croissance rapide, avec des applications variées telles que la gestion intelligente de l’énergie, les villes intelligentes, la surveillance de l’environnement et le suivi logistique. Selon une étude de McKinsey, l’IoT pourrait générer une valeur économique mondiale comprise entre 5,5 et 12,6 milliards de dollars d’ici 2030 (Chui *et al.*, 2021). Cette expansion est soutenue par l’intégration de technologies avancées, qui permettent aux équipements IoT de devenir plus intelligents et autonomes. Par exemple, dans le secteur de la santé, des équipements IoT connectés surveillent en temps réel les signes vitaux des patients, améliorant ainsi la qualité des soins. De même, dans l’industrie manufacturière, l’IoT optimise les processus de production en permettant une maintenance prédictive et une gestion efficace des ressources. Dans le domaine agricole, l’IoT joue un rôle important en facilitant l’agriculture de précision. Des capteurs intelligents surveillent les conditions du sol et des cultures, permettant aux agriculteurs d’ajuster l’irrigation et la fertilisation pour maximiser les rendements tout en réduisant l’utilisation des ressources (Jape *et al.*, 2023). Cependant, pour que ces appareils fonctionnent efficacement, ils nécessitent des solutions de communication capables de couvrir de longues distances tout en consommant peu d’énergie, car ils sont souvent alimentés par batterie et déployés dans des zones éloignées. C’est dans ce contexte les technologies LPWAN s’imposent comme une solution idéale pour l’IoT (Milarokostas *et al.*, 2023). Selon *IoT Analytics* (Analytics, 2024), le nombre de connexions LPWAN devrait atteindre 3 milliards d’ici 2027. Cette croissance illustre l’essor des LPWAN dans l’écosystème IoT.

1.2 Motivations

Contrairement aux technologies sans fil traditionnelles, telles que les réseaux cellulaires, les réseaux à courte portée (ex. ZigBee, Bluetooth, Z-Wave) ou les réseaux locaux sans fil (ex. Wi-Fi), les LPWAN se distinguent par leur capacité à offrir une connectivité longue

portée adaptée aux équipements IoT nécessitant une faible consommation d'énergie et un faible débit de données. Avec une couverture bien supérieure, pouvant atteindre plusieurs kilomètres, les LPWAN permettent de déployer des équipements IoT sur de grandes distances sans nécessiter une infrastructure dense de passerelles ou de réseaux en maillage (Aggarwal et Nasipuri, 2019).

Parmi les technologies LPWAN, les plus connues sont Sigfox, NB-IoT et LoRaWAN (Chilamkurthy *et al.*, 2022). Elles partagent des caractéristiques qui répondent aux besoins des réseaux LPWAN : (i) une grande portée, (ii) un faible débit, et (iii) une faible consommation énergétique. LoRaWAN et Sigfox se distinguent par leur utilisation de bandes de fréquences ISM (industriel, scientifique et médical) libres, ce qui réduit les coûts d'exploitation en évitant les licences coûteuses, comme celles exigées par le NB-IoT (Milarokostas *et al.*, 2023). Cette caractéristique rend LoRaWAN et Sigfox plus économiques pour de nombreuses applications IoT.

De plus, LoRaWAN offre des performances énergétiques supérieures à celles de Sigfox et du NB-IoT (Lykov *et al.*, 2020; Marini *et al.*, 2022), ainsi qu'un débit plus élevé que Sigfox (Kadusic *et al.*, 2022). Une autre étude montre aussi que LoRaWAN a une meilleure latence par rapport à Sigfox et NB-IoT (Stanco *et al.*, 2022). Ainsi, LoRaWAN présente un équilibre optimal entre les besoins de portée, de consommation d'énergie, de débit et de latence. Ces avantages nous motivent à approfondir l'étude de cette technologie, dans le but d'optimiser ses performances et d'améliorer sa fiabilité pour des déploiements à grande échelle.

1.3 Problématique

Dans l'architecture du LoRaWAN, deux couches fondamentales sont définies : la couche physique, spécifiée par la modulation LoRa, et la couche de contrôle d'accès au support (en anglais, *medium access control* ou MAC), définie par LoRaWAN (Cheikh *et al.*, 2022). La couche physique LoRa utilise la technique de modulation *chirp* à spectre étalé (en anglais, *chirp spread spectrum* ou CSS), qui permet d'exploiter différents SFs. Ces SFs sont orthogonaux les uns par rapport aux autres, ce qui signifie que les transmissions utilisant des

SFs différents peuvent coexister sans interférer entre elles (Cheikh *et al.*, 2022). Cette orthogonalité permet aux équipements de transmettre leur paquets simultanément sur plusieurs canaux, c.-à-d. sur plusieurs SFs, même si ceux-ci se chevauchent en fréquence, sans risque de collisions (Maurya *et al.*, 2022).

LoRaWAN repose principalement sur un protocole d'accès aléatoire nommé ALOHA (Abramson, 1970), un protocole de communication conçu dans les années 1970 à l'Université d'Hawaï pour les réseaux radio. Son fonctionnement est simple : chaque équipement transmet ses données (paquets) à un moment aléatoire, sans nécessiter d'autorisation préalable. Cela rend le protocole facile à mettre en œuvre, mais augmente le risque de collisions lorsque plusieurs équipements transmettent en même temps. Lorsqu'une collision se produit, chaque équipement impliqué attend un délai aléatoire avant de réessayer d'envoyer ses données. Plus il y a d'équipements connectés, plus les collisions sont fréquentes, ce qui augmente les retransmissions et réduit l'efficacité du réseau. Ce phénomène limite la capacité d'ALOHA à gérer un trafic élevé, car le taux de succès des transmissions diminue à cause de la congestion du canal.

Pour surmonter ces limitations, plusieurs variantes ont été développées, notamment le protocole ALOHA discrétisé (en anglais, *slotted ALOHA* ou SA) (Gitman, 1975), CRDSA (Casini *et al.*, 2007) et IRSA (Liva, 2011).

SA est une première amélioration du protocole ALOHA, conçue pour réduire le taux de collisions en synchronisant les transmissions. Dans SA, le temps est divisé en créneaux temporels ou slots, et les équipements ne peuvent transmettre qu'au début d'un slot. Cette synchronisation diminue la probabilité de collision en limitant les transmissions simultanées. Cependant, le protocole reste moins efficace dans le cas où les données transmises sont perdues, car l'équipement concerné doit attendre le prochain slot pour réessayer. Cette attente peut introduire des délais supplémentaires, affectant ainsi l'efficacité et la rapidité de la communication.

CRDSA va plus loin en introduisant le concept de diversité. Chaque équipement envoie plusieurs copies de son paquet dans différents slots. Si une collision survient dans un slot donné,

les copies présentes dans d'autres slots peuvent encore permettre de reconstruire le paquet original. Pour maximiser l'efficacité de décodage, le CRDSA intègre la technique d'annulation successive d'interférences (en anglais, *successive interference cancellation* ou SIC). Cette technique permet au récepteur, une fois qu'une copie d'un paquet est correctement décodée dans un slot, de supprimer les copies correspondantes dans les autres slots où elles sont également présentes.

IRSA est une version encore plus avancée, qui adapte le nombre de copies de chaque paquet de manière irrégulière en fonction de la configuration du réseau et des besoins de fiabilité. Contrairement au CRDSA, où chaque équipement envoie un nombre fixe de copies, l'IRSA utilise une distribution de répétition optimisée. Ce protocole permet une utilisation plus efficace des ressources (Liva, 2011).

Comme indiqué précédemment, LoRaWAN repose essentiellement sur le protocole ALOHA, ce qui limite sa fiabilité en raison du taux de collisions élevé et de l'absence de mécanismes de retransmission efficaces. Cette limitation devient particulièrement problématique dans les environnements à forte densité d'équipements, où la probabilité de collision augmente considérablement. Afin d'améliorer la qualité de réception et renforcer la fiabilité de LoRaWAN, l'adoption d'un protocole telle que l'IRSA afin d'exploiter les SFs et de permettre aux équipements d'envoyer plusieurs copies sur différents SFs constitue une solution prometteuse.

1.4 Objectifs

L'objectif principal de ce travail est de proposer une solution d'accès aléatoire optimisée pour les réseaux LoRaWAN, en tirant parti des avantages du protocole IRSA et des spécificités des SFs. Pour ce faire, nous cherchons à concevoir un mécanisme capable de :

- adapter le protocole IRSA aux spécificités des réseaux LoRaWAN, en prenant en compte les contraintes liées aux communications à bas débit et longue portée ;
- gérer la transmission des copies de paquets en exploitant simultanément les dimensions temporelle et spatiale, en autorisant chaque équipement à envoyer un nombre variable de copies sur un ou plusieurs SFs disponibles ;

- réduire les collisions et les pertes de paquets par une répartition optimisée des copies dans le temps (plusieurs slots) et dans l'espace (plusieurs SFs), tout en assurant une bonne efficacité énergétique ;
- réaliser un décodage spatio-temporel en tirant parti des propriétés orthogonales des SFs et de la redondance temporelle, afin d'améliorer les performances de décodage via le processus SIC.

1.5 Méthodologie

La méthodologie adoptée pour ce travail de recherche comporte quatre étapes principales :

1. Une revue approfondie de la littérature a été menée pour acquérir une compréhension des technologies de réseaux LPWAN, en particulier LoRaWAN, ainsi que des protocoles d'accès aléatoire tels qu'ALOHA, SA et IRSA. Étant donné qu'IRSA constitue la base de notre recherche, une étude ainsi qu'une revue approfondie ont été réalisées sur les méthodes et les améliorations associées à ce protocole. L'élaboration d'un état de l'art a permis d'identifier les limitations de ces protocoles, justifiant ainsi le développement d'un modèle mieux adapté à LoRaWAN.
2. La formulation mathématique de notre approche a été développée pour permettre à chaque équipement de choisir le nombre de copies de son paquet à envoyer et de les transmettre sur un ou plusieurs SFs. Cette formulation vise à minimiser les collisions et les taux de perte en exploitant les dimensions temporelle (c.-à-d. les copies envoyées sur le même SF dans plusieurs slots) et spatiale (c.-à-d. les copies envoyées sur plusieurs SFs), tout en respectant les contraintes de capacité et de fiabilité propres aux réseaux LoRaWAN.
3. Un mécanisme de décodage spatio-temporel est proposé pour maximiser la qualité de réception. Ce mécanisme exploite les SFs et les slots afin de permettre un décodage robuste des paquets transmis par les équipements.
4. La performance de notre modèle a été évaluée à l'aide de simulations et d'une analyse asymptotique, en le comparant aux protocoles SA, CRDSA et IRSA. L'objectif est d'analyser les résultats de la solution proposée et d'évaluer l'impact de l'utilisation

des SFs disponibles ainsi que du nombre de copies envoyées sur chaque SF, en termes de fiabilité et d'efficacité du réseau, dans des scénarios de faible, moyenne et haute densité d'équipements.

1.6 Contributions

Ce travail propose une nouvelle solution, nommée SF-IRSA, qui combine les avantages des répétitions irrégulières du protocole IRSA et l'utilisation des SFs. Les principales contributions sont les suivantes :

- Nous développons un modèle analytique dans lequel un équipement peut envoyer plusieurs copies de son paquet en utilisant différents SFs. Ce modèle est formulé de manière à offrir à l'équipement le choix d'envoyer des copies temporellement sur un même SF ou spatialement sur plusieurs SFs.
- Nous concevons un processus de décodage nommé SF-IRSA-SIC, qui exploite la dimension temporelle en traitant les transmissions sur différents slots, permettant ainsi de capturer et de décoder les copies envoyées sur le même SF. Ce processus utilise également la dimension spatiale en tirant parti de l'orthogonalité des SFs pour décoder les copies transmises sur différents SFs. L'objectif est de maximiser les chances de récupération d'au moins une copie du paquet.
- Après avoir établi le cadre de décodage, nous analysons l'efficacité énergétique de cette approche en évaluant la consommation d'énergie associée à la transmission des copies sur les SFs utilisés.
- Nous évaluons la performance asymptotique et simulée de notre modèle en le comparant aux protocoles SA, CRDSA et IRSA. Cette évaluation prend en compte les métriques de débit, de taux de succès, de taux de perte ainsi que l'efficacité énergétique.

Concernant mes travaux de recherche liés à cette contribution, nous avons soumis un article pour évaluation :

- N. Benserir, Y. Etiabi, E. Sabir, E. Amhoud, H. Elbiaze, A.B. Diallo. "IRSA Over Spreading Factors for Spatio-Temporal SIC in Scalable LoRaWAN IoT Networks." 2025 Symposium on Computers and Communications.

1.7 Organisation du mémoire

Le présent mémoire est organisé comme suit :

Premièrement, dans le chapitre 2, nous abordons les concepts de base nécessaires pour bien comprendre le contenu du mémoire. Nous y introduisons les réseaux LPWAN et détaillons leurs caractéristiques et technologies, en mettant l'accent sur les spécificités de LoRaWAN, son architecture, y compris les couches physique et MAC. Ce chapitre explore également les protocoles d'accès aléatoire ALOHA, SA et propose une section détaillée sur le protocole IRSA.

Deuxièmement, dans le chapitre 3, nous passons en revue les travaux existants sur les méthodes d'amélioration de l'IRSA. Nous analysons ces méthodes en mettant en avant leurs avantages et limites, et identifions les lacunes qui justifient le développement d'une nouvelle approche adaptée aux réseaux LoRaWAN.

Troisièmement, le chapitre 4 présente la solution proposée, le protocole SF-IRSA. Nous y décrivons notre modèle de système et détaillons le processus de décodage spatio-temporel SF-IRSA-SIC. Ce chapitre expose également la formulation analytique de notre solution et inclut une analyse approfondie de l'efficacité énergétique du protocole.

Quatrièmement, dans la première partie du chapitre 5, nous fournissons une analyse asymptotique afin d'illustrer des exemples de choix et de distribution des SFs et de la charge du trafic mesurée. La seconde partie de ce chapitre est dédiée à l'analyse des résultats de simulation, où nous comparons la performance du protocole SF-IRSA avec les protocoles SA, CRDSA et IRSA.

Enfin, le chapitre 6 conclut ce mémoire en résumant les contributions principales de cette recherche et en proposant des perspectives pour des travaux futurs dans le domaine des réseaux LPWAN et LoRaWAN.

CHAPITRE 2

GÉNÉRALITÉS

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base nécessaires pour comprendre ce travail. Nous commençons par introduire les réseaux LPWAN, en décrivant leurs caractéristiques techniques et en comparant les principales technologies utilisées dans ce réseau. Ensuite, nous étudions en détail la technologie LoRaWAN en mettant l'accent sur ses spécifications et ses performances. Enfin, nous présentons les protocoles d'accès aléatoire ALOHA et SA, en nous concentrant sur le protocole IRSA.

2.2 Réseaux étendus à faible puissance

Les technologies LPWAN se distinguent par leur capacité à offrir une connectivité économe en énergie pour un grand nombre d'équipements répartis sur de vastes zones géographiques, tout en maintenant des coûts réduits (Raza *et al.*, 2017). La figure 2.1 (Sneha *et al.*, 2023) compare les principales familles de technologies sans fil selon plusieurs critères clés. Il apparaît clairement que les technologies LPWAN se distinguent par leur grande portée et leur faible consommation d'énergie.

De nombreuses recherches (Raza *et al.*, 2017; Ismail *et al.*, 2018; Sinha *et al.*, 2017; Buurman *et al.*, 2020; Mekki *et al.*, 2019; Khodayer Al-Dulaimi *et al.*, 2022; Chilamkurthy *et al.*, 2022; Jouhari *et al.*, 2023; Milarokostas *et al.*, 2023) montrent que les LPWAN sont bien adaptés aux grands systèmes IoT, où l'économie d'énergie et la réduction des coûts sont essentielles, même si cela implique des compromis sur la latence et le débit. Ces études mettent en évidence les caractéristiques principales et les besoins spécifiques des LPWAN, permettant de définir leurs principaux objectifs de conception, en mettant l'accent sur la grande couverture, la faible consommation d'énergie et le coût réduit, qui seront explorés en détail dans la section suivante.

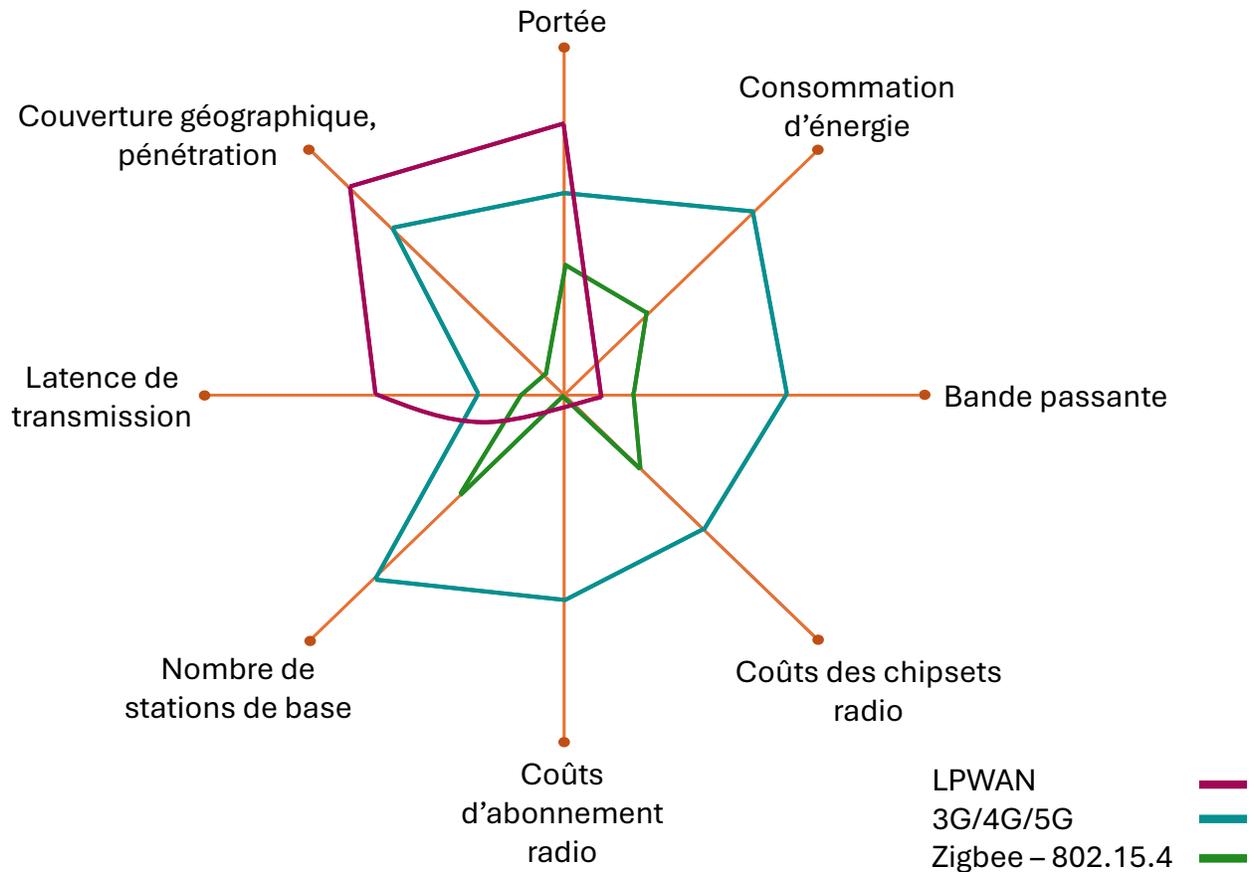


FIGURE 2.1 – Comparaison des technologies sans fil selon différentes métriques de performance.

Source : (Sneha et al., 2023)

2.2.1 Principales caractéristiques des réseaux LPWAN

A) Grande couverture

Les technologies LPWAN assurent une connectivité sur de longues distances grâce à l'utilisation de techniques de modulation avancées, notamment à bande étroite (en anglais, *narrow-band*) et à spectre étalé (en anglais, *spread spectrum*). Par exemple, la technologie NB-IoT utilise une modulation à bande étroite (3GPP, 2015). Cette technique offre un budget de liaison élevé (en anglais, *link budget*) grâce à l'encodage des signaux dans une bande passante réduite (typiquement inférieure à 25 kHz), ce qui réduit les interférences et améliore la portée des signaux (Xu et al., 2018). Cela permet de connecter un grand nombre d'équipements sur une petite portion du spectre, tout en maintenant une faible consommation d'énergie (Raza

et al., 2017). Certaines technologies, comme Sigfox, exploitent des bandes ultra-étroites (en anglais, *ultra narrow band*), où chaque canal occupe une bande de fréquence extrêmement réduite, souvent de l'ordre de quelques centaines de hertz (100 Hz) (Milarokostas *et al.*, 2023). D'autres technologies LPWAN, telles que LoRaWAN, utilisent des techniques d'étalement de spectre (en anglais, *spread spectrum*) (Cheikh *et al.*, 2022), qui étalent le signal sur une large bande de fréquences, augmentant ainsi la portée des communications tout en les rendant plus résistantes aux interférences.(Elzeiny *et al.*, 2021).

Pour atteindre encore de plus grandes distances, les LPWAN utilisent principalement des bandes de fréquences sous-GHz, c'est-à-dire des bandes situées en dessous de 1 GHz, qui sont idéales pour les communications à longue portée grâce à leur meilleure pénétration des obstacles et leur portée étendue (Raza *et al.*, 2017). Les signaux émis à ces fréquences traversent facilement des obstacles tels que les murs et les arbres, améliorant ainsi la couverture aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur (Chilamkurthy *et al.*, 2022).

B) *Efficacité énergétique*

Les technologies LPWAN sont conçues pour minimiser la consommation d'énergie des équipements, permettant ainsi une durée de vie de batterie de plusieurs années (Milarokostas *et al.*, 2023). Cette efficacité énergétique repose sur plusieurs stratégies clés. Premièrement, la majorité des technologies LPWAN adoptent une topologie en étoile (Mekki *et al.*, 2018), où chaque équipement communique directement avec une station de base, éliminant le besoin de relayer les paquets via d'autres nœuds IoT. Cela réduit la congestion du réseau et diminue les transmissions supplémentaires, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements (Chilamkurthy *et al.*, 2022).

Ensuite, pour simplifier la conception des équipements, les LPWAN délèguent la plupart des tâches complexes, comme la gestion des canaux et l'optimisation de la transmission, aux stations de base et aux serveurs (Jouhari *et al.*, 2023). Par ailleurs, dans certaines technologies comme LoRaWAN, les équipements intègrent des mécanismes de gestion de l'énergie, notamment grâce aux classes de fonctionnement. LoRaWAN définit trois classes

d'équipements (A, B et C) permettant d'équilibrer la consommation d'énergie et la latence de communication selon les besoins applicatifs. De plus, les cycles de mise en veille réduisent encore la consommation énergétique et prolongent la durée de vie des batteries (Chilamkurthy *et al.*, 2022). De plus, les équipements exploitent également la bande sous-GHz, comme mentionné précédemment, qui offre une excellente propagation des signaux à faible puissance.

C) Faible coût

Le succès commercial des LPWAN repose en grande partie sur leur faible coût, qui permet de connecter un grand nombre d'équipements à un tarif abordable. Les études indiquent que le coût des équipements devrait idéalement être inférieur à 5 USD, avec des frais d'abonnement annuels par équipement aussi bas que 1 USD (Raza *et al.*, 2017). Cette accessibilité financière positionne les LPWAN comme une alternative économique aux réseaux cellulaires et aux technologies sans fil à courte portée, leur permettant d'adresser une large gamme d'applications IoT.

Les LPWAN parviennent à réduire les dépenses d'investissement (en anglais, *capital expenditure*) et d'exploitation (en anglais, *operational expenditure*) pour les utilisateurs (ceux qui utilisent l'IoT) et les opérateurs (ceux qui offrent le service IoT) grâce à plusieurs stratégies (Hossain et Markendahl, 2021). L'utilisation d'une topologie en étoile, combinée à la simplicité des protocoles MAC et au déport des tâches complexes vers les stations de base, permet de concevoir des équipements à la fois simples et peu coûteux, sans nécessiter de relais onéreux (Sinha *et al.*, 2017). De plus, des technologies comme Sigfox et LoRaWAN, qui opèrent sur des bandes de fréquences ISM (non licenciées), contribuent encore à réduire les coûts.

2.2.2 Technologies LPWAN

Dans cette section, nous présentons les technologies LPWAN les plus connues, en nous concentrant sur NB-IoT et Sigfox. La section 2.3 est consacrée à une explication détaillée de LoRaWAN, tandis que la section 2.4 propose une comparaison de ces technologies.

A) NB-IoT

NB-IoT est une technologie IoT basée sur les réseaux cellulaires, standardisée par le 3GPP (en anglais, *3rd generation partnership project*) pour fonctionner dans les bandes sous licence des réseaux d'évolution à long terme (en anglais, *long terme evolution* ou LTE) (Tabbane, 2018). Elle opère dans les bandes de fréquences inférieures à 1 GHz, comme les bandes 700, 800 et 900 MHz en Europe, qui peut également utiliser des bandes supérieures, comme 1,8 GHz et 2,1 GHz, en fonction des régions (Mekki *et al.*, 2019). La bande passante de 180 kHz utilisée par le NB-IoT est dédiée à la fois à la transmission montante (en anglais, *uplink*) et à la réception descendante (en anglais, *downlink*). Contrairement à la transmission *uplink*, qui repose sur l'accès multiple par répartition fréquentielle à porteuse unique (en anglais, *single carrier frequency division multiple access* ou SC-FDMA), la transmission *downlink* du NB-IoT utilise la technologie de modulation appelée accès multiple par répartition fréquentielle orthogonale (en anglais, *orthogonal frequency division multiple access* ou OFDMA) (3GPP, 2024).

NB-IoT offre trois modes d'opération, permettant de l'adapter aux conditions de déploiement et aux besoins de couverture (Milarokostas *et al.*, 2023), comme montré dans la figure 2.2 (Mekki *et al.*, 2018) :

- A) Mode bande de garde (en anglais, *guard-band*) : NB-IoT utilise l'espace de bande de garde entre les porteuses LTE, là où il n'y a généralement pas de trafic. Ce mode permet un déploiement économique sans interférer avec les signaux LTE.
- B) Mode en bande (en anglais, *in-band*) : NB-IoT fonctionne dans une bande de fréquence existante LTE, en partageant le spectre avec LTE sans interférer avec les autres communications LTE. Ce mode est avantageux pour les opérateurs, car il n'exige pas de bande supplémentaire dédiée.
- C) Mode autonome (en anglais, *standalone*) : Ce mode est particulièrement utile dans des fréquences indépendantes des réseaux LTE, comme les bandes de système mondial de communication avec les mobiles (en anglais, *global system for mobile communications* ou GSM) ou des bandes spécifiques réservées aux communications IoT. Il assure une

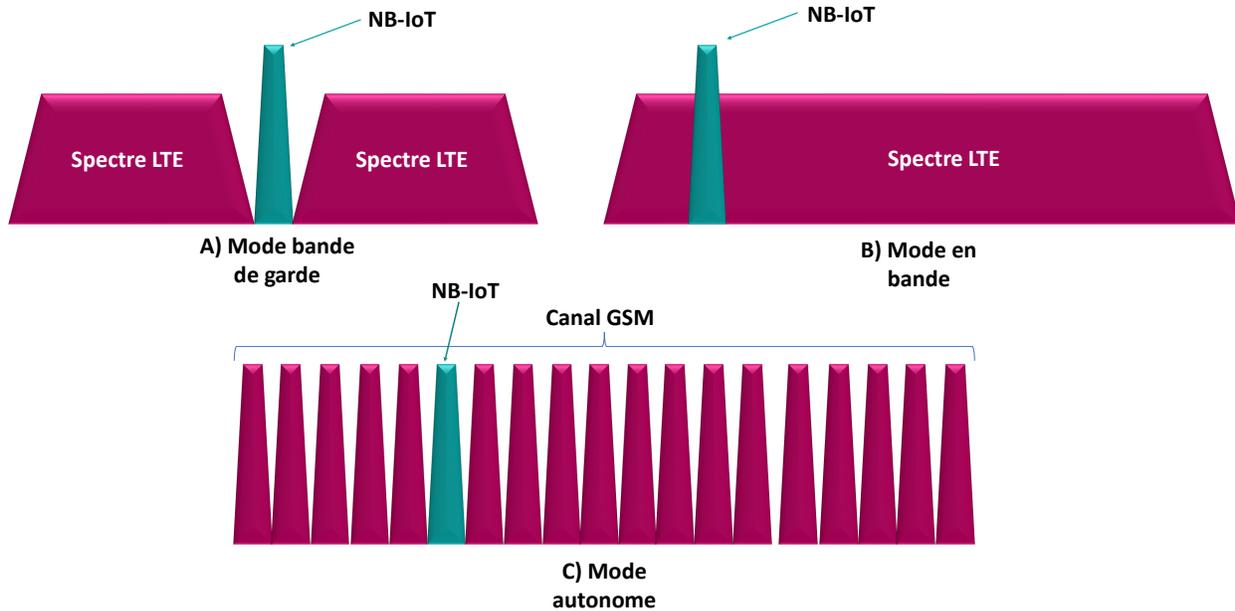


FIGURE 2.2 – Modes d’opération pour NB-IoT.

Source : (Mekki et al., 2018)

couverture étendue sans interférence LTE et est idéal pour des zones mal desservies ou en périphérie.

Pour économiser l’énergie et prolonger la durée de vie des batteries, NB-IoT intègre des fonctionnalités de gestion de l’alimentation avancées, comme le mode d’économie d’énergie (en anglais, *power saving mode* ou PSM) et le mode de réception discontinue étendue (en anglais, *extended discontinuous reception* ou eDRX) (Sultania et al., 2021). Le mode PSM met les équipements en veille prolongée sans qu’ils se déconnectent du réseau, leur permettant de rester inactifs entre les transmissions sans surveiller le canal radio. En eDRX, les équipements se réveillent à des intervalles définis pour vérifier la présence de messages du réseau. Ces intervalles sont configurables et peuvent varier de quelques secondes à plusieurs heures, permettant aux équipements de recevoir des données descendantes de manière espacée (Sultania et al., 2021).

B) Sigfox

Sigfox est une technologie LPWAN développée par l’entreprise française Sigfox S.A., fondée

en 2009 et basée à Toulouse (Sigfox general technical overview, 2017). La société gère à la fois l'infrastructure réseau et la technologie, offrant une couverture mondiale à travers des partenariats locaux pour déployer ses stations de base dans plus de 70 pays. Elle opère dans les bandes de fréquences ISM. L'architecture de Sigfox repose sur des bandes ultra-étroites et utilise une topologie en étoile. En termes de modulation, Sigfox emploie le D-BPSK (en anglais, *differential binary phase-shift keying*) pour les communications en *uplink* et le GFSK (en anglais, *gaussian frequency-shift keying*) pour le *downlink* (Sigfox radio specifications, 2023). Le réseau est conçu pour des transmissions économes en énergie, avec un débit limité à 100 bits par seconde et des messages de petite taille (jusqu'à 12 octets en liaison montante) (Lavric *et al.*, 2019). Les équipements peuvent émettre jusqu'à 140 messages (données) par jour, ce qui rend la technologie idéale pour les applications qui nécessitent des transmissions peu fréquentes et de faibles volumes de données (Sigfox general technical overview, 2017; Sigfox radio specifications, 2023).

2.3 Spécifications du LoRaWAN

Essentiellement, la spécification LoRaWAN comprend trois éléments principaux : l'architecture du réseau, la couche physique, et la couche MAC (Petäjärvi *et al.*, 2017).

2.3.1 Architecture du réseau

Le réseau LoRaWAN fonctionne selon une topologie en étoile dans laquelle les équipements communiquent leurs données aux passerelles LoRa, qui les transmettent ensuite à un serveur réseau central via une connexion IP (Mikhaylov *et al.*, 2017). Cette configuration simplifie le fonctionnement et réduit le trafic réseau lié au routage des informations (Filho *et al.*, 2016), tout en permettant des communications longue distance en zones rurales (15 à 20 km) et urbaines (2 à 8 km) (Cheikh *et al.*, 2022).

Comme le montre la figure 2.3 (LoRa Alliance, 2015a), la passerelle LoRa assure l'échange et le routage des données entre les équipements et le serveur réseau, ce dernier servant comme relais entre les applications exécutées sur les équipements et les serveurs applicatifs.

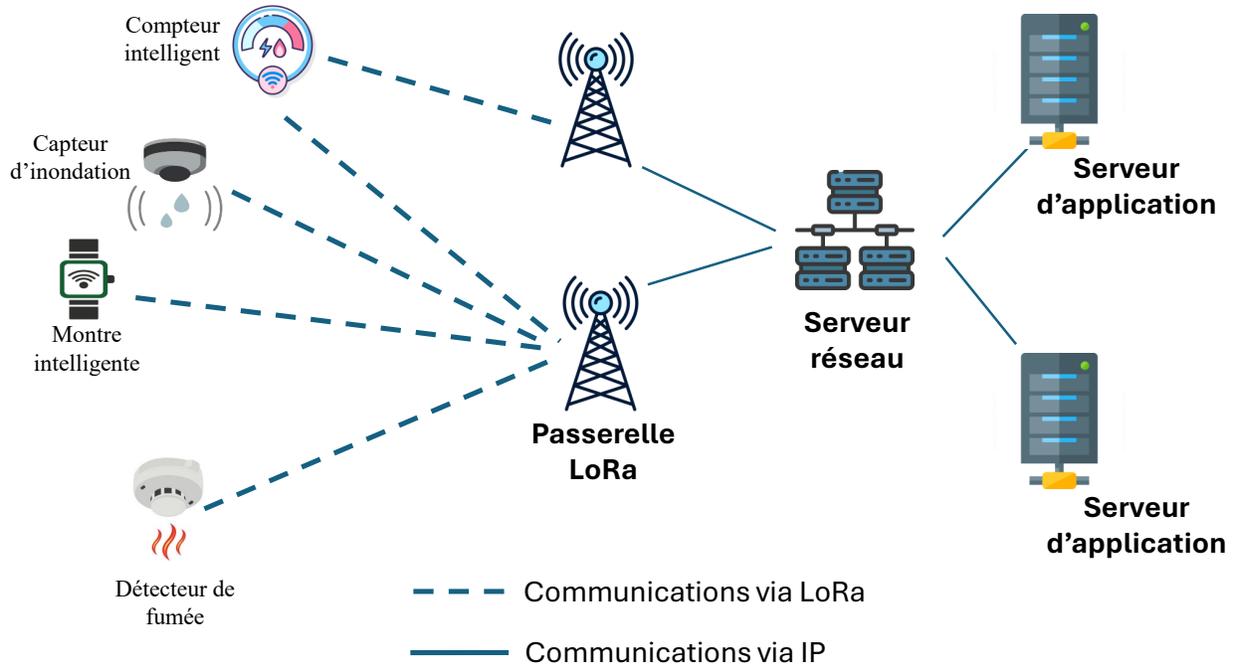


FIGURE 2.3 – Architecture d'un réseau LoRaWAN.

Source : (LoRa Alliance, 2015b)

Les composants principaux du réseau LoRaWAN sont :

- **Équipements** : Ce sont des dispositifs intégrant la technologie LoRa, incluent des capteurs, des actionneurs ou une combinaison des deux, capables d'envoyer ou de recevoir des données (LoRa Alliance, 2015a).
- **Passerelles LoRa** : Elles sont responsables de relayer les données entre les équipements LoRa et les serveurs de réseau. Une passerelle peut gérer plusieurs équipements sur de grandes distances, facilitant les communications bidirectionnelles (Adelantado *et al.*, 2017).
- **Serveur de réseau** : Dans LoRaWAN, le serveur de réseau gère toutes les passerelles, équipements et applications (The Things Network, 2015). Il établit des connexions sécurisées en utilisant le standard de chiffrement avancé (en anglais, *advanced encryption standard* ou AES) pour protéger les messages échangés entre les équipements et le serveur d'applications (Anantachaisilp *et al.*, 2020), assurant ainsi une sécurité de bout en bout. Le serveur sélectionne la meilleure passerelle pour le routage des mes-

sages, et envoie des commandes de débit de données adaptatif (en anglais, *adaptive data rate* ou ADR) pour optimiser le débit des équipements (Jouhari *et al.*, 2023). L'ADR est un mécanisme essentiel qui ajuste automatiquement le débit de données et la puissance d'émission des équipements en fonction de la qualité du signal et des conditions du réseau (Reynders *et al.*, 2017). Par exemple, les équipements proches des passerelles LoRa utilisent un débit de données plus élevé pour réduire le temps de transmission, tandis que les équipements plus éloignés passent à un débit plus faible pour augmenter leur portée. L'ADR ajuste également la puissance d'émission : une bonne qualité de signal entre un équipement et une passerelle permet de réduire la puissance pour économiser l'énergie, tandis qu'un signal faible nécessite une puissance plus élevée pour assurer la réception des données (Jouhari *et al.*, 2023).

- **Serveur d'application** : Un réseau LoRaWAN peut inclure plusieurs serveurs d'application. Ces serveurs sont responsables du traitement, de l'analyse et de l'interprétation des données collectées par les équipements. Ils rendent ces données accessibles aux applications IoT finales, permettant leur utilisation dans divers cas d'usage comme la gestion intelligente, la surveillance en temps réel ou l'automatisation des processus (Milarokostas *et al.*, 2023).

Le réseau LoRaWAN repose sur deux composants : LoRa, est une modulation de la couche physique (PHY), et LoRaWAN, qui représente le protocole de la couche MAC (Milarokostas *et al.*, 2023). La figure 2.4 présente la pile protocolaire de LoRaWAN. Cette figure illustre le concept correspondant présenté dans (LoRa Alliance, 2020).

Nous abordons ensuite les éléments essentiels des couches PHY et MAC.

2.3.2 Couche physique

Cette couche repose sur la modulation CSS combinée à la technique d'autocorrection des erreurs (en anglais, *forward error correction* ou FEC). Nous définissons par la suite quelques aspects clés de cette couche :

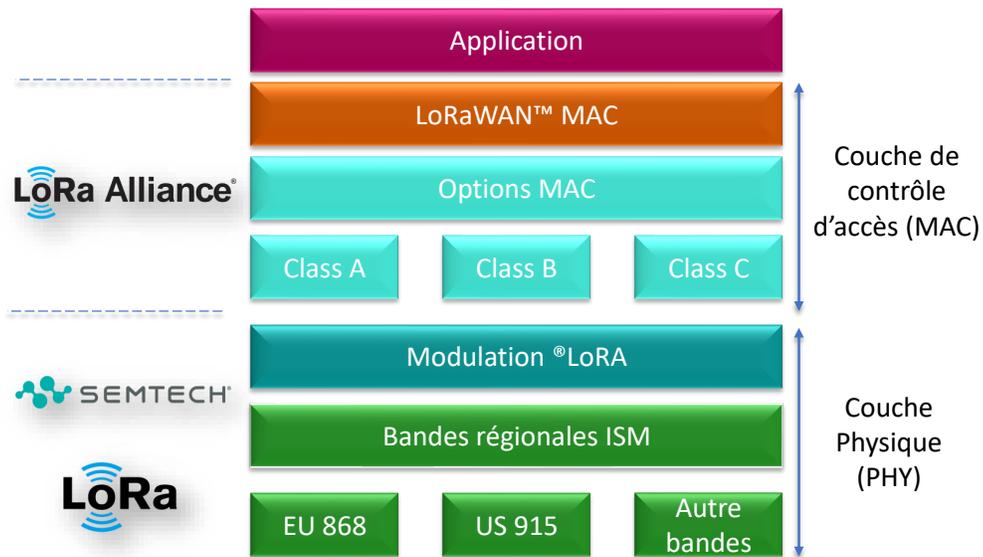


FIGURE 2.4 – Pile protocolaire de LoRaWAN.

Source : (LoRa Alliance, 2020)

A) *Le modèle de propagation :*

Les modèles de propagation sont essentiels pour estimer l'atténuation du signal radio dans les réseaux de communications (Jouhari *et al.*, 2023). En évaluant la puissance du signal reçu, ils s'appuient sur des calculs de perte de propagation qui prennent en compte une multitude de facteurs, tels que la distance entre les équipements et les passerelles, la fréquence de transmission, ainsi que le type d'environnement (urbain, suburbain ou rural). Parmi les modèles couramment utilisés dans les réseaux LoRaWAN, le modèle d'Okumura-Hata (Hata, 1980).

Le modèle d'Okumura-Hata estime l'atténuation de propagation L_{pr} comme suit (Marini *et al.*, 2022) :

— Scénario d’une zone rurale :

$$\begin{aligned}
 L_{pr}(\text{rurale}) &= 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) \\
 &\quad - 0.8 - (1.1 \log_{10}(f) - 0.7) h_m + 1.56 \log_{10}(f) \\
 &\quad + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d) \\
 &\quad - 4.78 (\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94 + s
 \end{aligned}$$

— Scénario d’une zone urbaine :

$$\begin{aligned}
 L_{pr}(\text{urbaine}) &= 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) \\
 &\quad - 3.2 (\log_{10}(11.75))^2 - 4.97 \\
 &\quad + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d) + s
 \end{aligned}$$

où :

- L_{pr} est l’atténuation totale en dB,
- f représente la fréquence porteuse de LoRa. LoRaWAN utilise différentes bandes de fréquences selon les régions du monde, principalement dans les bandes ISM, telles que 868 MHz en Europe, 915 MHz en Amérique du Nord et 433 MHz dans certaines régions d’Asie. Une liste complète des différentes bandes se trouve dans ce manuel (LoRaWAN Regional Parameters, 2020).
- h_b [mètre] est la hauteur de l’antenne de la passerelle LoRa par rapport au sol,
- h_m [mètre] représente la hauteur de l’équipement au-dessus du sol,
- d [km] est la distance entre la passerelle LoRa et l’équipement,
- s représente les fluctuations aléatoires du canal dues à l’effet d’ombrage, modélisées par une variable aléatoire gaussienne avec une moyenne nulle et un écart-type σ , c.-à-d., $s \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Dans les zones rurales, la portée de LoRa peut s’étendre sur de longues distances tout en maintenant une perte de propagation bien inférieure à celle observée en milieu urbain (voir figure 2.5).

B) La modulation CSS et la caractérisation du canal :

La modulation CSS utilisée dans LoRa encode le signal porteur sous forme de séries d’impulsions appelées *chirps*, qui sont ensuite traitées par le mécanisme FEC avant la transmission

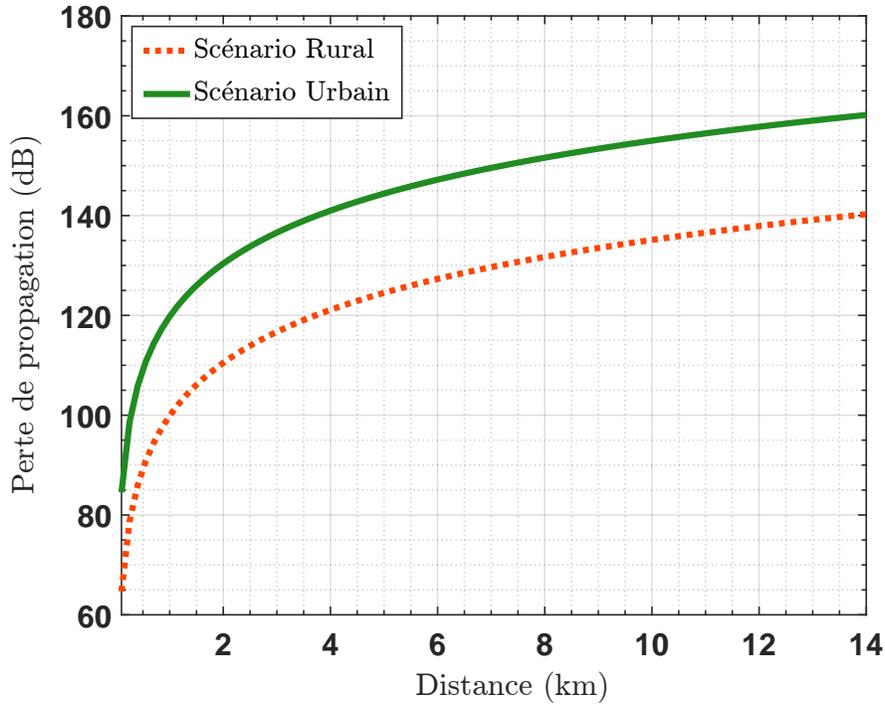


FIGURE 2.5 – Perte de propagation en fonction de la distance pour deux scénarios : rural et urbain.

des données (Jouhari *et al.*, 2023). Chaque *chirp* représente un symbole, soit une séquence d’information modulée dans le domaine temporel par une variation de fréquence. Dans ce contexte, un symbole correspond à l’unité de données envoyée, codée sous la forme d’un *chirp* unique dont la durée et le profil dépendent du SF (Maleki *et al.*, 2024). Le *chirp* est défini par une réponse en fréquence linéaire qui évolue d’une fréquence initiale f_0 à une fréquence finale f_1 sur une période de temps.

La modulation LoRa utilise deux types principaux de *chirps* (Bizon Franco de Almeida *et al.*, 2021) (voir figure 2.6 (Maleki *et al.*, 2024)). Le premier type est le *chirp* montant (en anglais, *up-chirp*), où la fréquence augmente linéairement du minimum au maximum. Concrètement, la fréquence part de $f_{\min} = f - \frac{BW}{2}$ et évolue jusqu’à $f_{\max} = f + \frac{BW}{2}$, où BW représente la largeur de bande du signal. Le second type, le *chirp* descendant (en anglais, *down-chirp*), est l’inverse du *chirp* montant. Dans ce cas, la fréquence diminue de f_{\max} à f_{\min} , créant une modulation complémentaire. Ce *chirp* inverse facilite la synchronisation et le décodage et permet au récepteur de différencier les symboles par l’utilisation de *chirps* opposés (Jouhari

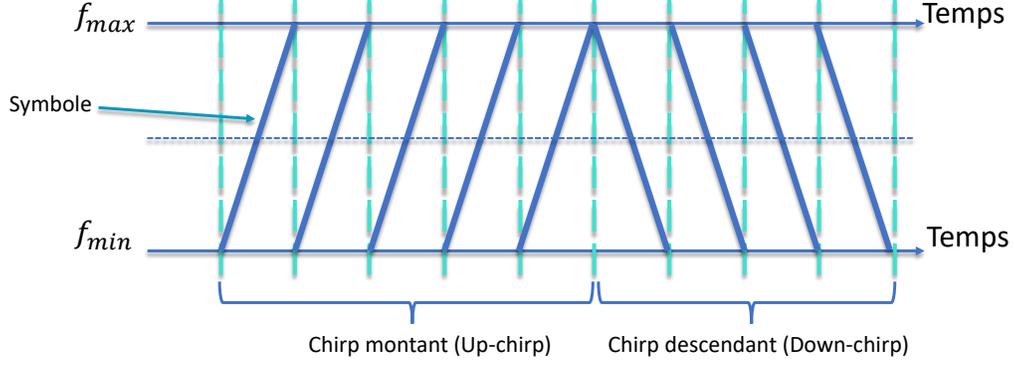


FIGURE 2.6 – Représentation du signal *chirp* dans la modulation LoRa.

Source : (Maleki et al., 2024)

et al., 2023).

La fréquence initiale du *chirp* correspond aux valeurs représentées par le symbole. Un SF se définit en fonction du nombre de *chips* ω (un *chirp* est composé de plusieurs *chips*, formant ainsi la base du signal étalé) et peut être exprimé par (Semtech Corporation, 2015) :

$$SF = \log_2(\omega) = \log_2\left(\frac{R_s}{R_c}\right),$$

où $\omega = \{128, 256, 512, 1024, 2048, 4096\}$, avec R_c représentant le taux de *chip* (*chips*/seconde) et R_s le taux de symboles transmis (symboles/seconde). Ces taux sont définis par les relations suivantes :

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF}, \quad R_s = \frac{BW}{2^{SF}}.$$

D'après ces relations, les valeurs possibles de SF pour LoRa sont $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, permettant jusqu'à six transmissions simultanées en utilisant des SFs différents. Le choix du SF et de la largeur de bande BW influence également le débit de données R et le taux de codage (en anglais, *coding rate* ou CR) (Cheikh et al., 2022). Le CR représente le rapport entre les bits de données utiles et le nombre total de bits transmis (incluant les bits de correction d'erreur). Les valeurs de CR utilisées dans le standard LoRa sont $\{4/5, 4/6, 4/7, 4/8\}$, indiquant qu'une valeur plus petite de CR améliore la résilience contre les erreurs, mais réduit le débit légèrement (voir figure 2.7). Le débit de données R s'exprime alors comme suit :

$$R = \frac{SF \times BW \times CR}{2^{SF}}. \quad (2.1)$$

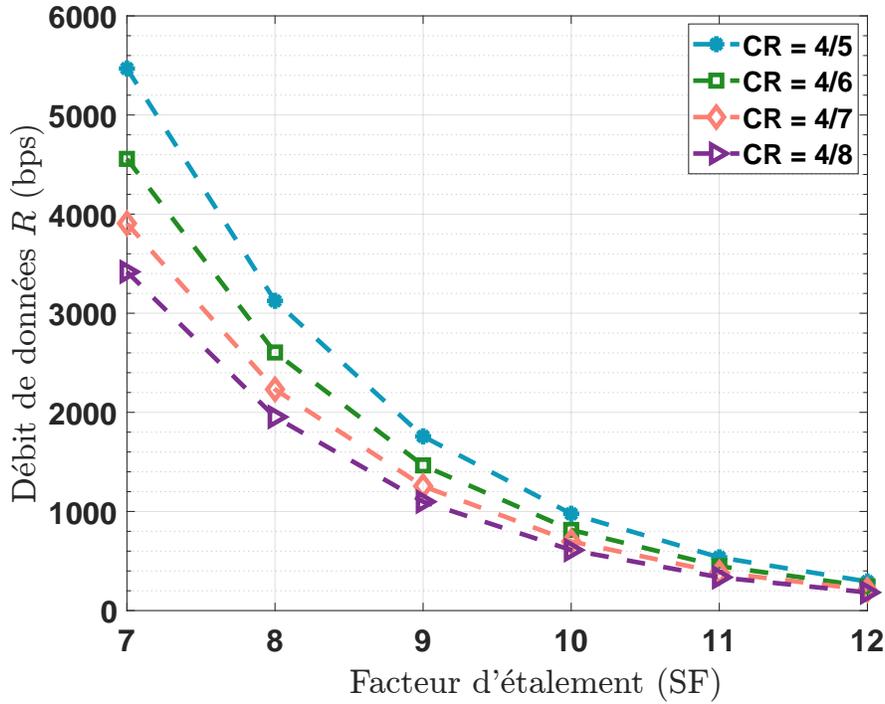


FIGURE 2.7 – Débit de données R en fonction du SF pour différents CR avec $BW = 125$ kHz.

La figure 2.7, obtenus en utilisant l'équation (2.1), montrent qu'un SF élevé réduit le débit de données, ainsi qu'un CR plus faible le diminue légèrement.

C) Paquet LoRa :

La structure d'un paquet LoRa est illustrée dans la figure 2.8 (Gutiérrez-Gómez *et al.*, 2021). L'explication des différents champs est la suivante :

- **Préambule** : Le préambule est constitué d'une séquence de symboles montants, dont le nombre est programmable et peut varier de 6 à 65 535. Il permet aux passerelles LoRa de détecter la présence d'un signal LoRa (Angrisani *et al.*, 2017).
- **Synchronisation (SYNC)** : Ce champ assure la synchronisation des symboles de trame, grâce à deux symboles montants permettant d'identifier les réseaux LoRa. La synchronisation de fréquence est également assurée à l'aide de deux symboles descendants et d'un symbole descendant de 0,25, suivi d'un court silence pour aligner la fréquence et la synchronisation temporelle du récepteur (Gutiérrez-Gómez *et al.*,

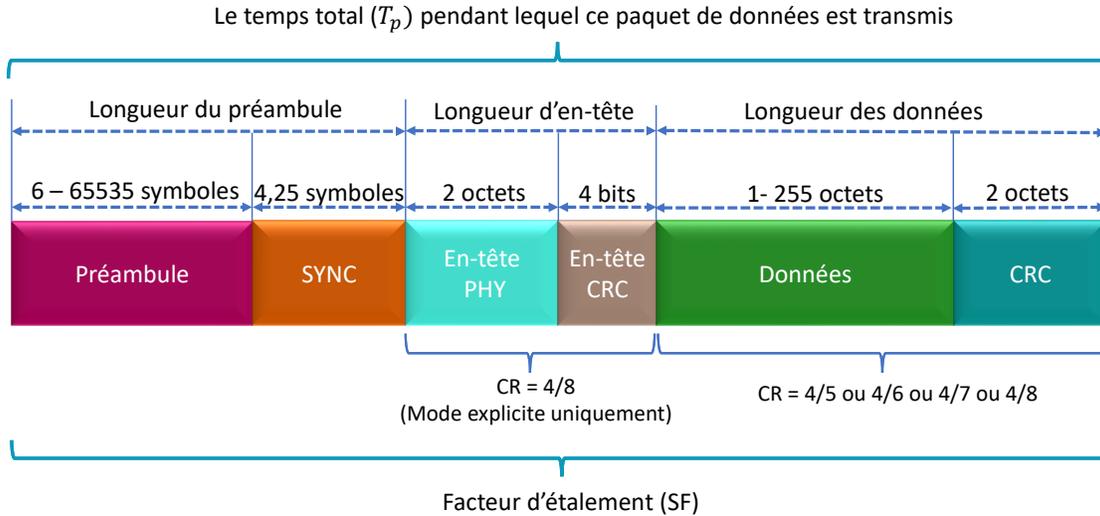


FIGURE 2.8 – Structure d'un paquet LoRa (couche physique)

Source : (Gutiérrez-Gómez et al., 2021)

2021).

- **En-têtes PHY et CRC** : Ce champ peut être configuré en mode explicite ou implicite. En mode explicite, l'en-tête contient des informations essentielles telles que la longueur de la charge utile (données), le CR , ainsi que la présence éventuelle d'un contrôle d'intégrité des données (en anglais, *cyclic redundancy check* ou CRC). L'en-tête explicite occupe 20 bits et est transmis avec un CR de $4/8$ (Casals et al., 2017). En mode implicite, l'en-tête est désactivé. Ce mode est adapté lorsque les paramètres de configuration sont déjà connus, ce qui permet de réduire la durée de la transmission.
- **Données** : Ce champ peut contenir entre 1 octet et 255 octets. En mode explicite, un CRC facultatif peut être ajouté à la fin de la charge utile pour garantir l'intégrité des données.

En se basant sur la figure 2.8, le temps de transmission T_p d'un paquet LoRa correspond au temps nécessaire pour transmettre le préambule, l'en-tête et les données. Ainsi, T_p est donné par :

$$T_p = T_{\text{préambule}} + T_{\text{données}} \quad (2.2)$$

La durée pour envoyer le préambule ($T_{\text{préambule}}$) est calculée comme suit :

$$T_{\text{préambule}} = (n_{\text{préambule}} + 4.25) \times T_{\text{symbole}} \quad (2.3)$$

où $n_{\text{préambule}}$ correspond à 8 symboles (valeur fixée pour la bande US915 (LoRaWAN Regional Parameters, 2020)), et T_{symbole} représente le temps nécessaire pour transmettre un symbole, défini par :

$$T_{\text{symbole}} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.4)$$

La durée pour envoyer la charge utile (T_{payload}) inclut le nombre de symboles de la charge utile et la durée d'un symbole :

$$T_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \times T_{\text{symbole}} \quad (2.5)$$

Le nombre de symboles de la charge utile n_{payload} est calculé comme suit :

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8 \cdot B - 4 \cdot SF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0 \right) \quad (2.6)$$

où :

- B est la longueur de la charge utile, en octets.
- CRC vaut 1 si un contrôle de redondance cyclique est présent, sinon 0.
- H (en-tête) vaut 0 en mode implicite (lorsque l'en-tête de la couche physique est activé) et 1 en mode explicite.
- DE vaut 1 si le SF est supérieur à 10, sinon 0.

Donc,

$$T_p = \left((n_{\text{préambule}} + 4.25) + \left(8 + \max \left(\left\lceil \frac{8 \cdot B - 4 \cdot SF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0 \right) \right) \right) \cdot \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.7)$$

D'après l'équation (2.7), il est clair que le choix des paramètres BW , SF et CR influence le temps de transmission T_p , comme illustré dans la figure 2.9. Plus les valeurs de SF et CR augmentent, plus le temps de transmission T_p augmente.

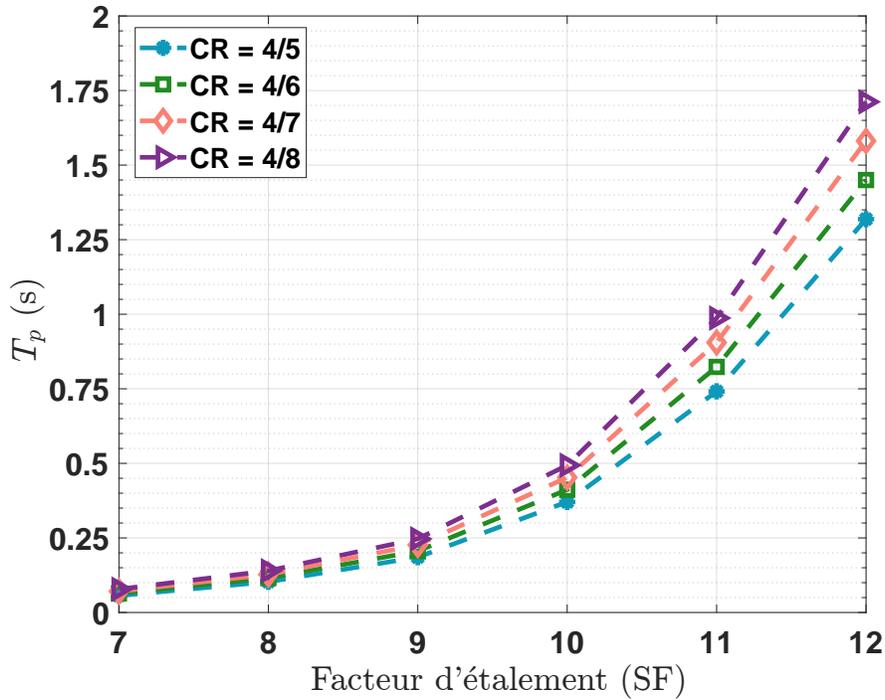


FIGURE 2.9 – Temps de transmission T_p en fonction du SF pour différents CR avec $BW = 125$ kHz.

2.3.3 Couche MAC

La couche MAC de LoRaWAN définit les règles et protocoles permettant aux équipements de se connecter et de communiquer avec les passerelles, tout en optimisant l'utilisation des ressources du canal radio. Elle gère notamment la transmission des messages *uplink* et *downlink*, les protocoles de sécurité, ainsi que les classes d'équipements, répondant ainsi à divers besoins en termes de latence et de consommation d'énergie (Cheikh *et al.*, 2022).

LoRaWAN prend en charge trois classes d'équipements, nommées A, B et C, adaptées aux besoins spécifiques des applications en matière de latence et de consommation d'énergie (The Things Network, 2015; Jouhari *et al.*, 2023). Tous les équipements doivent obligatoirement implémenter la classe A, tandis que les classes B et C sont des extensions facultatives qui ajoutent des fonctionnalités supplémentaires (The Things Network, 2015). Chaque classe prend en charge la communication bidirectionnelle *uplink* et *downlink*.

- **Classe A** : Un équipement de cette classe peut envoyer un message *uplink* à tout moment. Une fois la transmission *uplink* terminée, l'équipement ouvre deux courtes fenêtres de réception (RX1 et RX2) pour recevoir d'éventuels messages *downlink* en provenance du réseau. Entre la fin de la transmission *uplink* et le début de chaque fenêtre de réception, un délai (délai RX1 et délai RX2) est introduit. Si le serveur réseau ne répond pas dans ces fenêtres, le prochain message *downlink* sera programmé juste après la prochaine transmission *uplink*. Pour les fenêtres de réception de classe A, le serveur réseau peut choisir d'envoyer un message soit pendant la première fenêtre de réception (RX1), soit pendant la seconde (RX2), mais jamais dans les deux. Si aucun message *downlink* n'est reçu durant ces deux fenêtres, l'équipement retourne en mode veille pour économiser l'énergie. Les équipements de cette classe sont particulièrement économes en énergie, leur permettant de fonctionner sur batterie tout en restant en mode sommeil la majeure partie du temps, avec des intervalles prolongés entre les transmissions *uplink* (Jouhari *et al.*, 2023). Cependant, cette classe présente une latence élevée pour les messages *downlink*. La figure 2.10 (The Things Network, 2015) illustre le principe de fonctionnement de la classe A.

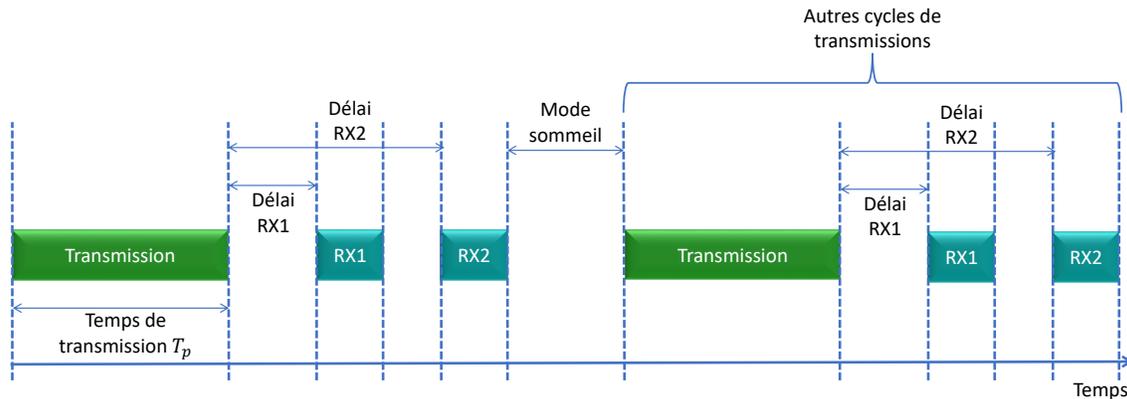


FIGURE 2.10 – Principe de fonctionnement de la classe A.

Source : (The Things Network, 2015)

- **Classe B** : Les équipements de cette classe étendent les capacités de la classe A en ouvrant périodiquement des fenêtres de réception supplémentaires appelées *ping slots* pour recevoir des messages *downlink*. Les passerelles du réseau diffusent péri-

diquement un signal de synchronisation (*BCN*), ou *beacon*, que les équipements de classe B utilisent pour aligner leur horloge interne sur celle du réseau. Grâce à cette synchronisation, le serveur réseau sait précisément quand il peut envoyer un message *downlink* à un équipement spécifique ou à un groupe d'équipements, optimisant ainsi la gestion des ressources du réseau.

L'intervalle entre deux *beacons* est appelé période de *beacon*. Après un *uplink*, les équipements ouvrent les mêmes fenêtres de réception RX1 et RX2 que la classe A. Toutefois, les équipements de cette classe ouvrent également les *ping slots*, ce qui réduit la latence des messages *downlink* par rapport à la classe A. En revanche, cette latence reste plus élevée que celle des équipements de classe C.

Souvent alimentés par batterie, les équipements de cette classe ont une autonomie plus courte que ceux de la classe A, car ils passent davantage de temps en mode actif pour recevoir les *beacons* et maintenir les *ping slots* ouverts (Jouhari *et al.*, 2023). La figure 2.11 (The Things Network, 2015) montre le principe de fonctionnement de la classe B.

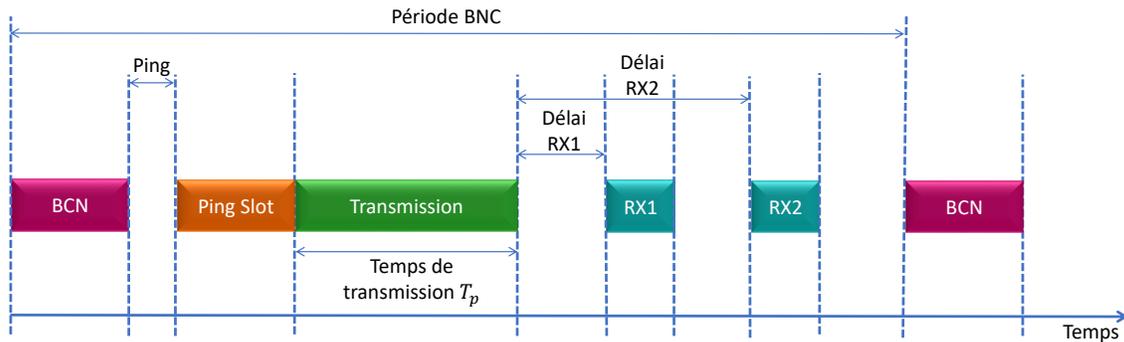


FIGURE 2.11 – Principe de fonctionnement de la classe B.

Source : (The Things Network, 2015)

- **Classe C** : Les équipements de cette classe étendent les capacités de la classe A en maintenant les fenêtres de réception ouvertes en permanence, sauf lors d'une transmission *uplink*. Cela permet aux équipements de recevoir des messages *downlink* à presque tout moment, offrant une latence minimale pour les messages descendants.

Les équipements de classe C ouvrent les fenêtres de réception RX1 et RX2 de manière similaire aux équipements de classe A, mais la fenêtre RX2 reste ouverte jusqu'à la prochaine transmission *uplink*. Après chaque *uplink*, une courte fenêtre RX2 s'ouvre, suivie d'une fenêtre RX1, puis la fenêtre RX2 s'ouvre en continu jusqu'à la prochaine transmission. Cette configuration minimise la latence pour les messages *downlink*, mais elle augmente considérablement la consommation d'énergie, car les récepteurs doivent rester constamment actifs. En conséquence, les équipements de classe C ne sont généralement pas alimentés par batterie pour de longues périodes, mais plutôt par une source d'alimentation continue (The Things Network, 2015). La figure 2.12 (The Things Network, 2015) montre le principe de fonctionnement de la classe C.

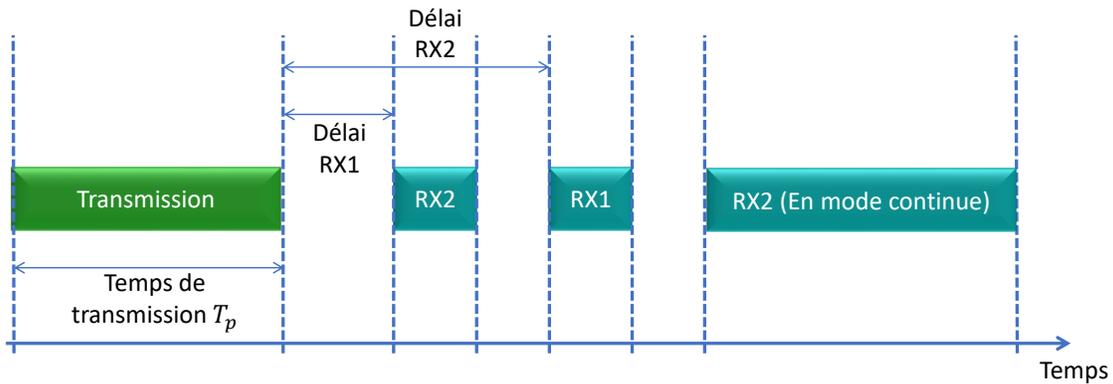


FIGURE 2.12 – Principe de fonctionnement de la classe C.

Source : (The Things Network, 2015)

2.4 Comparaison

Le tableau 2.1 présente une comparaison entre les technologies Sigfox, NB-IoT et LoRaWAN.

Comme mentionné précédemment, LoRaWAN utilise un protocole d'accès aléatoire basé sur ALOHA (Abramson, 1970), permettant à de nombreux équipements de communiquer sur le même canal sans coordination préalable. ALOHA, l'un des premiers protocoles d'accès aléatoire, a été initialement développé pour les réseaux radio. Il repose sur une transmission aléatoire où chaque équipement envoie des paquets de données dès qu'ils sont prêts, sans gestion centralisée de l'accès au canal. La section suivante présente les spécifications d'ALOHA,

de SA, ainsi qu'une étude approfondie du protocole IRSA.

TABLE 2.1 – Comparaison des technologies LPWAN : Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT.

(Mekki *et al.*, 2019; Hossain et Markendahl, 2021; Khodayer Al-Dulaimi *et al.*, 2022; Jouhari *et al.*, 2023)

Caractéristique	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Bande de fréquence	868, 915 MHz	433, 868, 915 MHz	700-2100 MHz
Spectre	Sans licence	Sans licence	Sous Licence
Bande passante	100 Hz	125, 250, 500 kHz	200 kHz
Modulation	D-BPSK / GFSK	CSS	$\frac{\pi}{2}$ -BPSK, $\frac{\pi}{2}$ -QPSK
Sensibilité du récepteur	-137 dBm	-137 dBm	-141 dBm
Charge utile maximale	12 (<i>uplink</i>) octets	243 octets	1600 octets
Distance	10 - 40 km	5 - 20 km	1 - 10 km
Débit maximal	100 bps	50 kbps	200 kbps
Cycle d'utilisation	140 msg/jour	1%	-
Sécurité	AES-128	AES-128	Hérite de la sécurité LTE
Standard	Non	LoRaWAN	3GPP release 13
Autonomie de la batterie	\approx 10 ans	\approx 10 ans	\approx 10 ans

2.5 Protocoles d'accès aléatoire

Les protocoles d'accès aléatoire permettent aux équipements de partager le même canal de communication sans coordination centralisée. Avec ALOHA, chaque équipement envoie ses données de manière aléatoire, ce qui entraîne un risque de collisions, réduisant l'efficacité du canal. Pour y remédier, SA divise le temps en slots, et les équipements ne peuvent émettre qu'au début d'un slot, ce qui diminue les collisions. Enfin, IRSA améliore SA en introduisant des répétitions de données et un mécanisme de décodage itératif, augmentant les chances de récupération des données même en présence de collisions (Liva, 2011).

2.5.1 Protocole ALOHA

Les équipements communiquent de manière asynchrone. Lorsque plusieurs équipements tentent de transmettre simultanément, leurs paquets peuvent entrer en collision. Une collision se produit lorsque deux ou plusieurs équipements transmettent leurs paquets au même moment, entraînant une perte des données transmises. Après une collision, les équipements doivent retransmettre leurs paquets après avoir attendu un délai aléatoire. Cependant, ces retransmissions peuvent également provoquer de nouvelles collisions si les équipements continuent d'envoyer leurs données au même moment.

Prenons un exemple où la longueur d'un paquet est représentée par τ , correspondant à la durée de transmission du paquet. Si un équipement commence à transmettre son paquet à l'instant t_e , tout autre équipement qui commence à transmettre dans l'intervalle $(t_e - \tau, t_e + \tau)$ provoquera une collision. En d'autres termes, si un autre équipement envoie son paquet avant la fin de la transmission initiée à t_e ou juste avant le début de cette transmission, il y aura un chevauchement des transmissions, entraînant la perte des paquets des deux équipements. La figure 2.13 (Tanenbaum, 2003) illustre les transmissions de quatre équipements. Le dé-

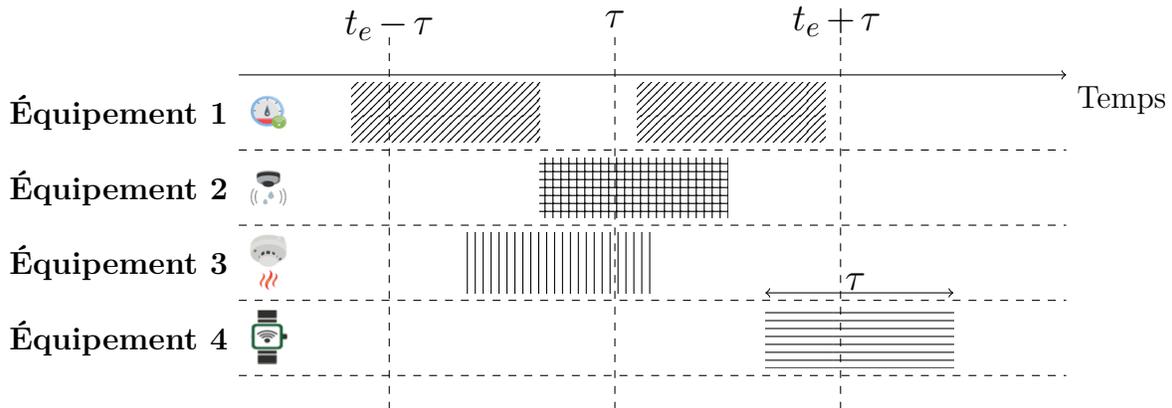


FIGURE 2.13 – Transmission des équipements IoT avec ALOHA.

Source : (Tanenbaum, 2003)

bit maximum, ou efficacité, du protocole ALOHA est cependant limité par les collisions fréquentes dues au manque de synchronisation (Beriooli *et al.*, 2016). Le débit du protocole ALOHA est directement lié à la probabilité qu'un paquet soit transmis avec succès. Cepen-

dant, cette probabilité dépend du trafic total G , qui représente le nombre moyen de tentatives de transmission par unité de temps. Cette probabilité est donnée par la formule suivante :

$$T_{ALOHA} = G \cdot e^{-2G} \quad (2.8)$$

où T représente le débit (c.-à.d., le nombre moyen de paquets transmis avec succès par intervalle de temps).

Le débit maximum est atteint pour $G = 0,5$, avec $T_{ALOHA} = \frac{1}{2e} \approx 0,184$. Ainsi, seulement 18,4% des transmissions réussissent, tandis qu'environ 81,6% des tentatives échouent en raison de collisions.

2.5.2 Protocole ALOHA discrétisé

Contrairement à ALOHA, où les équipements peuvent envoyer des paquets à tout moment, dans le SA, le temps est divisé en slots de durée égale, correspondant à la durée d'un paquet. Un équipement ne peut transmettre ses paquets qu'au début d'un slot, ce qui réduit la probabilité de collision en synchronisant les transmissions (Beroli *et al.*, 2016). Dans ce schéma, un paquet ne subit une collision que si un autre équipement tente de transmettre un paquet exactement au même slot. Si deux ou plusieurs équipements envoient leurs paquets au début du même slot, ces paquets entrent en collision et doivent être retransmis. La retransmission s'effectue après un délai aléatoire, afin d'éviter que les mêmes paquets ne se retrouvent à nouveau dans un même slot. La figure 2.14 (Tanenbaum, 2003) illustre un exemple de transmission.

Dans SA, la probabilité de succès est augmentée par rapport à ALOHA, car la fenêtre de collision est réduite à la durée d'un seul slot, contrairement à ALOHA où la fenêtre de collision est 2τ . La probabilité qu'un seul paquet soit transmis dans un slot donné (sans collision) est Ge^{-G} . Le débit maximal se produit lorsque $G = 1$, ce qui donne un débit maximum de :

$$T_{SA} = Ge^{-G} = \frac{1}{e} \quad (2.9)$$

En résumé, le SA améliore l'efficacité du réseau par rapport à l'ALOHA en réduisant la fenêtre des collisions possibles, augmentant ainsi la probabilité de transmission réussie. Toutefois,

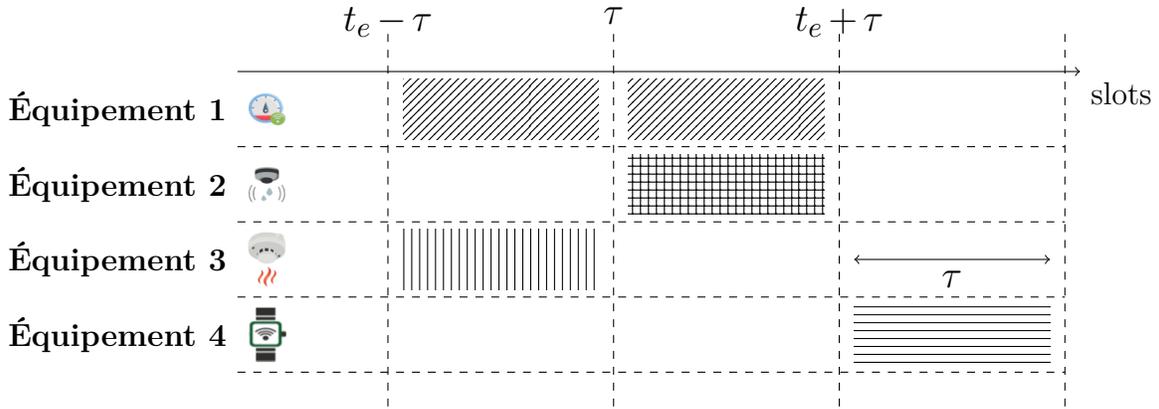


FIGURE 2.14 – Transmission des équipements IoT avec ALOHA discrétisé.

Source : (Tanenbaum, 2003)

bien que le SA double presque le débit maximum par rapport à l'ALOHA (qui est $\frac{1}{2e}$), comme le montre la figure 2.15, il reste limité par la possibilité de collisions, notamment dans les réseaux denses (Casini *et al.*, 2007). Le SA, tout comme l'ALOHA, a conduit au développement d'améliorations telles que le protocole IRSA, qui sera étudié dans la section suivante.

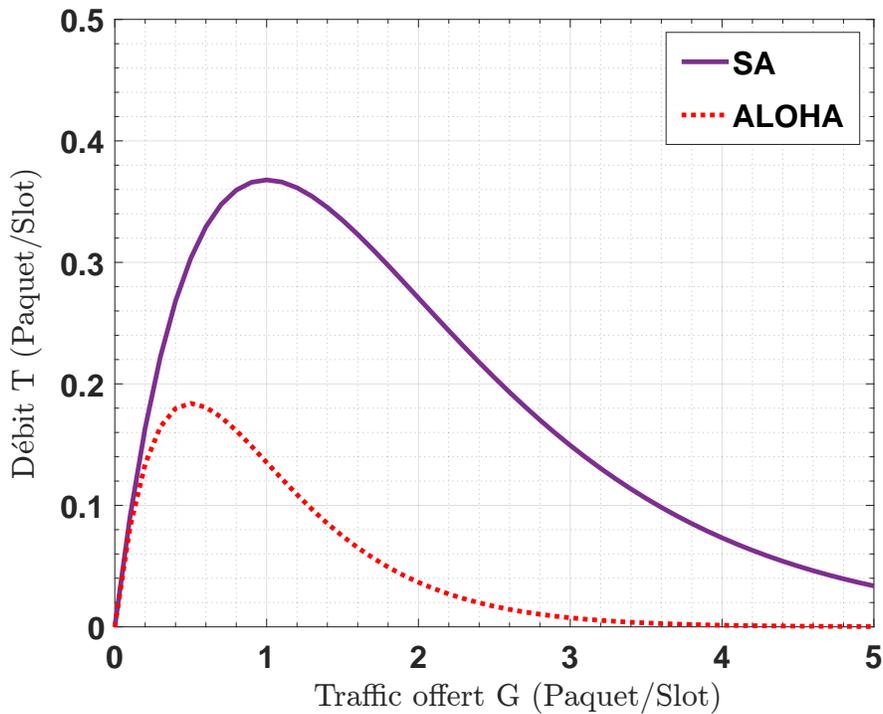


FIGURE 2.15 – Débit mesuré des protocoles ALOHA et SA.

2.5.3 Protocole ALOHA discrétisé à répétition irrégulière

Le protocole IRSA (Liva, 2011) vise à résoudre les limitations liées aux collisions dans des scénarios de transmissions massives. IRSA repose sur un schéma de transmission multi-répétition, où chaque équipement envoie plusieurs copies de son paquet dans un ensemble de slots au sein d'une trame, contrairement au SA classique, dans lequel chaque paquet est transmis une seule fois. IRSA introduit une redondance via des répétitions irrégulières. La distribution des copies suit une loi probabiliste prédéfinie, généralement optimisée pour maximiser le taux de décodage tout en minimisant les pertes dues aux collisions.

A) Concept d'IRSA :

Soit un système composé de M équipements et N slots dans une trame F , où chaque équipement sélectionne indépendamment un nombre de slots de manière aléatoire pour transmettre ses copies. Le protocole IRSA est modélisé par un graphe biparti $\mathbb{G} = (\mathcal{E}, \mathcal{S}, \mathcal{A})$, où \mathcal{E} représente l'ensemble des nœuds équipements (NEs), \mathcal{S} représente l'ensemble des nœuds slots (NSs), et \mathcal{A} désigne l'ensemble des arêtes reliant les NEs aux NSs (voir figure 2.16). Chaque

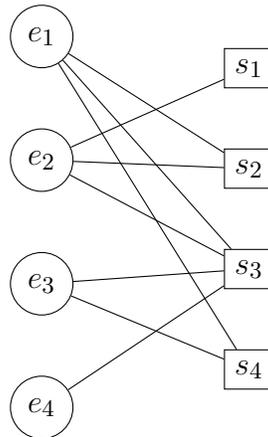


FIGURE 2.16 – Graphe biparti \mathbb{G} , où les arêtes modélisent les copies transmises par les nœuds équipements (NEs) et reçues par les nœuds slots (NSs).

NE $e_m \in \mathcal{E}$ correspond à un équipement qui envoie des copies de son paquet, tandis que chaque NS $s_j \in \mathcal{S}$ représente un slot dans lequel les copies peuvent être transmises. Une arête $a_{m,j} \in \mathcal{A}$ relie un NE à un NS, indiquant qu'un paquet transmis par l'équipement e_m

est reçu dans le slot s_j . Une fois le graphe \mathbb{G} défini, c.-à.d., après que les équipements ont envoyé leurs copies, le processus de décodage exploite ce graphe pour récupérer les paquets et annuler les interférences causées par les copies envoyées, comme décrit dans la section suivante.

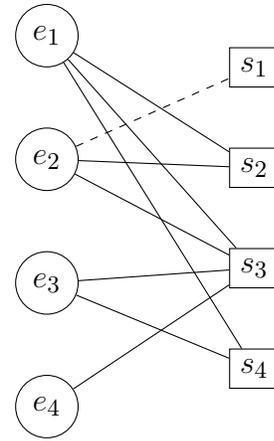
B) Modélisation du processus de décodage SIC :

Le processus de décodage dans IRSA repose sur le mécanisme SIC (Casini *et al.*, 2007), qui se déroule en plusieurs itérations. À chaque itération, les copies dans les slots sans collision (c.-à.d., les slots contenant une seule copie, ou les slots singletons) sont décodées immédiatement. Une fois décodées, les autres copies du même paquet envoyées dans d'autres slots sont supprimées, ce qui peut transformer des slots initialement en collision en slots singletons. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'aucun slot ne puisse plus être décodé, que tous les paquets soient correctement récupérés, ou que le processus atteigne un nombre maximal d'itérations de décodage, i_{max} (cette valeur est prédéfinie par le système).

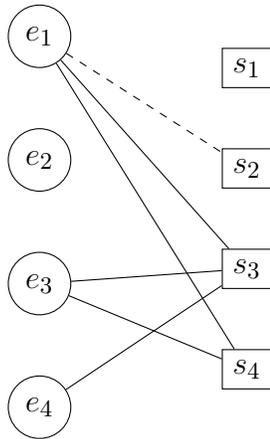
La figure 2.17 illustre les différentes itérations du processus SIC. La matrice présentée dans la figure 2.17a montre la distribution des transmissions des différents équipements sur les slots disponibles. Chaque ligne correspond à un équipement e_m qui envoie des copies de son paquet dans certains slots s_j . Une case remplie (■) indique qu'une copie du paquet de l'équipement e_m est transmise dans le slot s_j . Le processus de décodage commence par l'identification des slots singleton, c.-à.d., ceux ayant une seule arête, comme dans le cas du slot s_1 dans cet exemple. La copie du paquet associée à l'équipement e_2 est alors décodée (voir figure 2.17b). Une itération complète inclut à la fois la phase de décodage et celle de soustraction. Ainsi, les autres copies envoyées par e_2 sont retirées des slots s_2 et s_3 , où elles ont été transmises. Les arêtes correspondantes sont supprimées du graphe, ce qui peut entraîner l'apparition de nouveaux *singleton slots*, prêts pour une nouvelle itération (voir figure 2.17c). Ensuite, la copie envoyée par e_1 dans le slot s_2 est décodée, puis le mécanisme SIC soustrait les autres copies transmises dans les slots s_3 et s_4 (voir figure 2.17d). Ensuite, le slot s_4 devient singleton, ce qui permet le décodage et la soustraction des copies envoyées par e_3 (voir figure

Slots	s_1	s_2	s_3	s_4
e_1		■	■	■
e_2	■	■	■	
e_3			■	■
e_4			■	

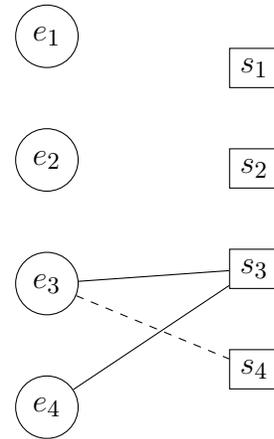
(a) matrice de répartition des transmissions dans les slots



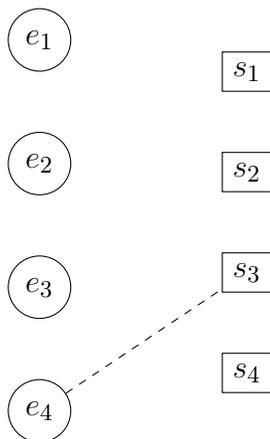
(b) itération 1



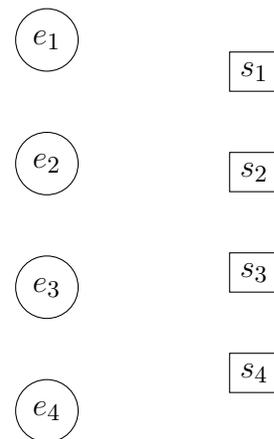
(c) itération 2



(d) itération 3



(e) itération 4



(f) itération 5

FIGURE 2.17 – Processus de décodage SIC.

2.17e). Enfin, la copie de e_4 est décodée, ce qui termine le processus de décodage.

C) Étude analytique :

La propagation des annulations successives dans ce graphe \mathbb{G} est similaire au décodage itératif des codes LDPC (Gallager, 1963), où l'objectif est d'éliminer les cycles et d'exploiter les redondances pour maximiser les performances du décodage. La probabilité de décodage réussi au cours des itérations dépend fortement de la structure du graphe \mathbb{G} et de la distribution des copies.

À ce stade, du point de vue des nœuds, chaque NE tire un nombre aléatoire de copies ℓ à transmettre dans une trame à partir d'une distribution de probabilité, notée $\{\Lambda_\ell\}$, où Λ_ℓ représente la probabilité qu'un équipement envoie ℓ copies. Du côté des NSs, la distribution décrivant la probabilité de recevoir ℓ copies est notée $\{\Psi_\ell\}$, avec Ψ_ℓ représentant la probabilité qu'un slot reçoive ℓ copies de paquets.

Ces distributions peuvent être représentées par des polynômes générateurs pour simplifier les calculs analytiques. Les polynômes associés $\Lambda(x)$ et $\Psi(x)$ sont définis comme suit :

$$\Lambda(x) \triangleq \sum_{\ell} \Lambda_{\ell} x^{\ell}, \quad \Psi(x) \triangleq \sum_{\ell} \Psi_{\ell} x^{\ell} \quad (2.10)$$

où $\Lambda(x)$ décrit la distribution des copies envoyées par les NEs et $\Psi(x)$ décrit la distribution des copies reçues par les NSs.

Il est important de noter que ' ℓ ' du point de vue du NE diffère de ' ℓ ' du point de vue du NS. Cependant, pour simplifier, la même notation est conservée.

Pour quantifier le nombre moyen de copies envoyées et reçues, nous utilisons la dérivée première des polynômes associés. Le nombre moyen de copies transmises par un NE est donné par la dérivée de $\Lambda(x)$, évaluée en $x = 1$, notée $\Lambda'(1)$. De même, le nombre moyen de copies reçues par un NS est donné par $\Psi'(1)$. Ces expressions s'écrivent comme suit :

$$\sum_{\ell} \ell \Lambda_{\ell} = \Lambda'(1), \quad \sum_{\ell} \ell \Psi_{\ell} = \Psi'(1) \quad (2.11)$$

Ainsi, la charge du système G , définie comme le rapport du nombre d'équipements au nombre de slots, peut être exprimée en fonction des moyennes des distributions $\Lambda(x)$ et $\Psi(x)$:

$$G = \frac{M}{N} = \frac{\Psi'(1)}{\Lambda'(1)} \quad (2.12)$$

Une méthode complémentaire pour analyser la convergence consiste à examiner les distributions de probabilité du point de vue des arêtes. Dans cette approche, les arêtes entre les NEs et les NSs sont considérées plutôt que les nœuds eux-mêmes.

Dans ce contexte, λ_ℓ représente la probabilité qu'une arête soit connectée à un NE ayant ℓ arêtes (c.-à.d., un NE qui envoie ℓ copies). De manière similaire, ρ_ℓ est la probabilité qu'une arête soit connectée à un NS ayant ℓ arêtes. Ainsi :

$$\lambda_\ell = \frac{\ell \Lambda_\ell}{\sum_\ell \ell \Lambda_\ell}, \quad \rho_\ell = \frac{\ell \Psi_\ell}{\sum_\ell \ell \Psi_\ell} \quad (2.13)$$

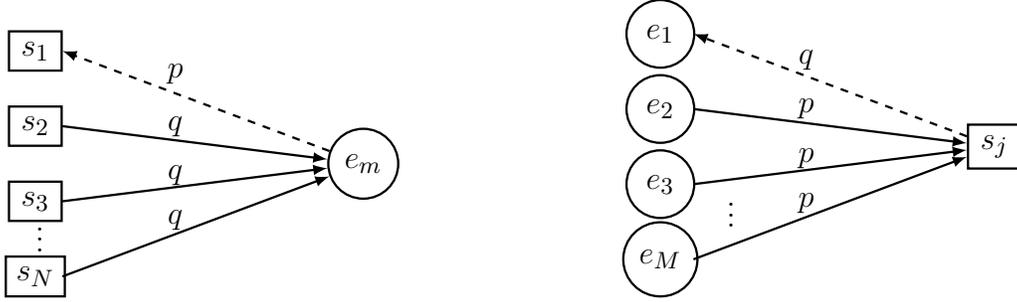
Les polynômes générateurs associés à $\{\lambda_\ell\}$ et $\{\rho_\ell\}$ sont définis comme suit :

$$\lambda(x) \triangleq \sum_\ell \lambda_\ell x^{\ell-1}, \quad \rho(x) \triangleq \sum_\ell \rho_\ell x^{\ell-1} \quad (2.14)$$

Afin de déterminer la performance asymptotique du système, une approche probabiliste itérative est utilisée. Les probabilités moyennes qu'une arête ne soit pas résolue, c'est-à-dire qu'elle n'ait pas permis le décodage du paquet auquel elle est associée, évoluent au fil des itérations du SIC, de manière similaire à l'évolution de densité des codes LDPC (Richardson et Urbanke, 2008). Cette méthode est importante pour l'analyse du processus de décodage itératif, permettant de caractériser le comportement asymptotique du protocole et de comprendre comment les probabilités de succès varient en fonction du nombre de copies et des paramètres du système.

Soient p et q les probabilités moyennes respectives qu'une arête connectée à un NE ou à un NS ne soit pas résolu à une itération donnée. Plus précisément, q , représente la probabilité qu'une arête choisie au hasard (dans le graphe \mathbb{G}) soit connectée à un NE non encore décodé, et p , la probabilité qu'une arête choisie au hasard soit connectée à un NS non encore décodé.

Côté NS, dans le processus SIC, si une seule copie reste dans un slot, elle peut être résolue. Par conséquent, après l'opération SIC au niveau d'un NS, la probabilité qu'une arête ne



(a) la probabilité ‘ q ’ qu’une arête soit connectée à un NE est inconnue.

(b) la probabilité ‘ p ’ qu’une arête connectée à un NS ne soit pas encore révélée.

FIGURE 2.18 – Représentation graphique des probabilités q et p pour IRSA.

soit pas résolue à cette itération dépend des autres arêtes connectées au même NS, comme illustré dans la figure 2.18a. Pour un NS ayant ℓ arêtes, une de ses arêtes peut être résolue si les $\ell - 1$ autres arêtes connectées à ce NS sont déjà connues ou résolues. Donc, la probabilité qu’une arête ne soit pas résolue est donnée par :

$$1 - p = (1 - q)^{\ell-1} \quad \Rightarrow \quad p = 1 - (1 - q)^{\ell-1} \quad (2.15)$$

Côté NE, si l’une des copies envoyées a été résolue à la dernière itération du côté NS, toutes les copies du paquet deviennent connues (résolues) (voir figure 2.18b). En d’autres termes, si l’une des copies envoyées dans un NS est décodée, les autres copies peuvent être supprimées. Ainsi, du côté NE, la probabilité qu’une arête ne soit pas résolue est mise à jour comme suit :

$$q = p^{\ell-1} \quad (2.16)$$

Étant donné que le nombre de copies varie selon une distribution donnée $\Lambda(x)$, et conformément à l’analyse en arbre étudiée dans (Luby *et al.*, 1998a), les équations (2.15), (2.16) sont moyennées en fonction des distributions de probabilités des arêtes, comme indiqué dans l’équation (2.14), ce qui donne :

$$p_i = \sum_{\ell} \rho_{\ell} \left(1 - (1 - q_i)^{\ell-1} \right) = 1 - \rho(1 - q_i) \quad (2.17)$$

$$q_i = \sum_{\ell} \lambda_{\ell} p_{\ell-1}^{i-1} = \lambda(p_{i-1}) \quad (2.18)$$

où i représente le numéro d’itération.

En substituant l'équation (2.17) dans (2.18), nous obtenons l'équation de mise à jour itérative suivante :

$$q_i = \lambda(1 - \rho(1 - q_{i-1})) \quad (2.19)$$

Afin de déterminer la charge asymptotique maximale G^* supportée par une distribution fixe $\Lambda(x)$, il est nécessaire de dériver $\lambda(x)$ et $\rho(x)$. La distribution $\lambda(x)$ peut être calculée directement à partir de l'équation (2.13). Concernant $\rho(x)$ et comme montré dans (2.11), le nombre moyen de copies reçues par un slot est $\Psi'(1)$. Par conséquent, une copie est envoyée dans un slot avec une probabilité de $\Psi'(1)/M$. En notant que le nombre d'arêtes connectées à un slot suit une distribution binomiale, nous avons donc :

$$\Psi_\ell = \binom{M}{\ell} \left(\frac{\Psi'(1)}{M} \right)^\ell \left(1 - \frac{\Psi'(1)}{M} \right)^{M-\ell} \quad (2.20)$$

et le polynôme générateur correspondant est donné par :

$$\Psi(x) = \sum_{\ell} \Psi_\ell x^\ell = \left(1 - \frac{\Psi'(1)(1-x)}{M} \right)^M \quad (2.21)$$

Pour appliquer l'analyse probabiliste asymptotique, un nombre infini de slots et d'équipements est supposé. Ainsi, en utilisant l'approximation de Poisson pour des distributions binomiales lorsque $M \rightarrow \infty$ dans (2.21), et en substituant les variables de l'équation (2.12), il est possible d'obtenir :

$$\Psi(x) = e^{-\Psi'(1)(1-x)} = e^{-G\Lambda'(1)(1-x)} \quad (2.22)$$

D'après (2.13), nous avons également :

$$\rho(x) = \frac{\Psi'(x)}{\Psi'(1)} = e^{-G\Lambda'(1)(1-x)} \quad (2.23)$$

Maintenant, pour des valeurs de G inférieures à un certain seuil G^* , les copies envoyées par les NEs seront récupérées avec une probabilité proche de 1. Le seuil G^* est ainsi défini comme la valeur maximale de G telle que l'inégalité suivante soit vérifiée :

$$q > \lambda(1 - \rho(1 - q)), \quad \forall q \in (0, 1]. \quad (2.24)$$

(L'indice i a été supprimé, en partant de l'hypothèse qu'un nombre suffisamment grand d'itérations du processus SIC est réalisé pour décoder toutes les copies des NEs). En substituant l'équation (2.23) dans (2.24), nous obtenons l'équation suivante :

$$q < \lambda \left(1 - e^{-qG\Lambda'(1)} \right), \quad \forall q \in (0, 1]. \quad (2.25)$$

Liva (Liva, 2011) a imposé une condition selon laquelle la valeur de q doit diminuer à chaque itération. Par conséquent, cette inégalité implique que, pour toute valeur de $G < G^*$, la probabilité d'échec du décodage diminue, ce qui permet de maximiser le débit $T_i = G(1 - L_i)$ à chaque itération i , où L représente le taux de perte de paquets (en anglais, *packet loss rate* ou *PLR*), défini comme suit :

$$L_i = \Lambda(p_i) \quad (2.26)$$

En supposant que le nombre d'itérations du SIC est suffisamment grand pour assurer le décodage de toutes les copies ($i_{max} \rightarrow \infty$), nous obtenons :

Le débit asymptotique T :

$$T = G(1 - L) \quad (2.27)$$

Le taux de perte de paquets asymptotique L :

$$L = \Lambda(p) \quad (2.28)$$

En plus des équations dérivées pour calculer le PLR et T , un algorithme de recherche basé sur l'évolution différentielle (Storn et Price, 1997b) est utilisé pour trouver des distributions $\Lambda(x)$ qui offrent des valeurs de G^* optimales. Différents exemples de distributions $\Lambda(x)$ et les valeurs de G^* sont reportés dans le tableau 2.2 (Liva, 2011).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré le réseau LPWAN et ses principales technologies, notamment LoRaWAN, Sigfox et NB-IoT, avec une attention particulière accordée à LoRaWAN. Nous avons également présenté les protocoles d'accès ALOHA et SA. Enfin, nous avons

TABLE 2.2 – Exemples de distributions $\Lambda(x)$ et des valeurs de la charge maximale G^* associées.

distribution, $\Lambda(x)$	G^*
$0.5102x^2 + 0.4898x^4$	0.868
$0.5631x^2 + 0.0436x^3 + 0.3933x^5$	0.898
$0.5465x^2 + 0.1623x^3 + 0.2912x^6$	0.915
$0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$	0.938
$0.4977x^2 + 0.2207x^3 + 0.0381x^4 + 0.0756x^5 + 0.0398x^6$ $+0.0009x^7 + 0.0088x^8 + 0.0068x^9 + 0.003x^{11} + 0.0429x^{14}$ $+0.0081x^{15} + 0.0576x^{16}$	0.965

introduit le protocole IRSA ainsi que son analyse théorique, qui servira de base à l'étude approfondie du chapitre 4. Avant cela, une revue de la littérature sera proposée dans le chapitre 3 pour situer notre étude dans le contexte des recherches existantes.

CHAPITRE 3

ÉTAT DE L'ART

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les travaux de recherche liés à l'IRSA, en mettant l'accent sur les améliorations liées à la capacité du système à décoder plusieurs paquets simultanément et à la gestion de la puissance. Nous traiterons également des recherches qui analysent les aspects énergétiques et l'âge de l'information de l'IRSA.

3.2 Méthodes et approches développées pour les améliorations de l'IRSA

Nous présentons dans cette section les différentes techniques proposées dans la littérature pour améliorer le protocole IRSA. Nous nous concentrons plus particulièrement sur les travaux portant sur le décodage multi-paquets, la gestion de la puissance, l'analyse énergétique et l'âge de l'information. Ces axes constituent le socle de réflexion sur lequel s'appuie la suite de ce mémoire, en vue de concevoir un schéma de décodage spatio-temporel et de mener une analyse approfondie sur les aspects liés à l'efficacité énergétique.

3.2.1 Améliorations basées sur le décodage multi-paquets et la gestion de la puissance

Le travail présenté dans (Ghanbarinejad et Schlegel, 2013) a exploré l'amélioration de l'IRSA avec des capacités de détection multi-paquets (K-IRSA), permettant le décodage conjoint de K paquets en collision. Cette amélioration répond aux limitations du modèle de résolution initial proposé par (Liva, 2011), où le décodeur peut décoder un paquet soit lorsqu'il n'est pas en collision avec d'autres paquets (c.-à-d., singletons), soit lorsque l'interférence causée par les autres paquets en collision a été annulée lors des itérations précédentes du processus SIC. En intégrant le décodage simultané, cette approche supporte des charges système plus élevées et atteint des performances proches de la borne dans le cas non asymptotique pour $K = 3$ et $K = 4$ (c.-à-d., le système est capable de décoder respectivement 3 et 4 paquets conjointement). Cependant, comme démontré par (Hmedoush *et al.*, 2020a), cette approche

(K-IRSA) ne peut en réalité pas atteindre la borne théorique supérieure de K paquets par slot, même dans le cas asymptotique. Dans cette étude, une nouvelle borne est dérivée en s'appuyant sur une recherche efficace des paramètres optimaux tels que Λ , λ , G , etc. (voir section 2.5.3). Ce travail montre ainsi que la limite de K paquets par slot peut être approchée numériquement. L'étude de (Feng *et al.*, 2022) analyse les performances de l'IRSA avec réception multi-paquets sous un canal à effacement. Le récepteur est capable de récupérer simultanément plusieurs paquets en collision dans ce type de canal et les probabilités d'échec de décodage sont dérivées pour caractériser le taux de perte de paquets ainsi que le débit du système.

La gestion de la puissance est importante pour améliorer le débit et le taux de perte de paquets. Le premier système IRSA basé sur l'accès multiple non-orthogonal (en anglais, *non-orthogonal multiple access* ou NOMA) est étudié dans (Shao *et al.*, 2019). Dans ce système :

- Différentes puissances de transmission sont attribuées aux équipements afin d'optimiser le taux de réussite de la transmission et minimiser les interférences.
- Une distribution de puissance prédéfinie est développée, avec des niveaux de puissance discrets.
- Une méthode d'évolution différentielle est employée pour ajuster le nombre de copies envoyées par les équipements.

Dans (Jia *et al.*, 2019), un algorithme de contrôle adaptatif est proposé pour ajuster la distribution des copies, également appelée distribution des degrés. Dans le graphe G (expliqué dans la section 2.5.3), un nœud équipement possédant ℓ arêtes est considéré comme ayant un degré ℓ . Cet algorithme, nommé contrôle de suivi de la distribution des degrés (en anglais *tracking degree distribution control*), permet d'ajuster dynamiquement la distribution des degrés en fonction de la charge du réseau. Les équipements sont répartis en groupes selon les niveaux de puissance reçue : élevés ou faibles et la distribution des copies est ajustée en conséquence pour réduire le nombre de copies et la puissance inutile, optimisant ainsi les performances du réseau. Une amélioration poursuivie par (Hmedoush *et al.*, 2020b), où une nouvelle approche a été mise en place pour classer les équipements selon la puissance qu'ils

reçoivent. L'adaptation de l'IRSA pour l'internet industriel des objets dans le cadre de la 5G est proposée dans (Gürsu *et al.*, 2019), où une méthode d'IRSA basée sur multi-canaux (MC-IRSA) est introduite pour satisfaire les exigences strictes en termes de latence et de fiabilité. L'IRSA est également conçu pour s'adapter aux environnements IoT 6G, comme l'illustre (Ramatryana *et al.*, 2021). Dans (Huang *et al.*, 2021), une approche a été développée pour exploiter le domaine de puissance et l'hétérogénéité entre les équipements (c.-à-d., différents types d'équipement sont considérés), permettant de décoder simultanément plusieurs paquets en collision dans un même slot. Le processus SIC est divisé en deux sous-processus :

- Un SIC *intra-slot*, où le décodage se fait au niveau du slot qui permet de décoder correctement les collisions en fonction de la puissance de réception et du type d'équipement (c.-à-d., le système exploite l'hétérogénéité des équipements).
- Un SIC *inter-slot*, où les copies décodées par le SIC *intra-slot* sont ensuite utilisées pour résoudre d'autres collisions dans des slots différents.

Le protocole proposé est représenté par un graphe bipartite composé de nœuds variables hétérogènes, qui correspondent aux équipements, et de nœuds de slots. Ce modèle développe une évolution de densité multidimensionnelle (*intra-slot* et *inter-slot*). Un problème d'optimisation est ensuite formulé pour maximiser l'efficacité du système et déterminer la distribution optimale de copies pour chaque type d'équipement.

Ces travaux ne prennent pas en compte les pertes dues à la propagation, ce qui a conduit au développement du système SG-NOMA-IRSA (en anglais, *spatial group-based-NOMA-IRSA*) (Qin *et al.*, 2024). SG-NOMA-IRSA améliore les performances des réseaux de capteurs (équipements) IoT en regroupant spatialement les équipements en fonction des pertes de propagation et en utilisant un contrôle de puissance inversé pour amplifier les différences de niveaux de puissance reçue. Ce regroupement permet un multiplexage des équipements dans des groupes distincts utilisant les mêmes ressources. Une fonction adaptative de distribution de degrés et un problème d'optimisation conjoint sont formulés pour maximiser le débit et réduire la consommation d'énergie.

3.2.2 Améliorations proposées pour l’analyse de l’aspect énergétique et de l’âge d’information

Les travaux récents sur l’efficacité énergétique des systèmes IRSA ont fait l’objet de nombreuses contributions. La récolte ou récupération d’énergie (en anglais, *energy harvesting*) est une technique permettant de capturer et de convertir des sources d’énergie environnementales, telles que la lumière, les vibrations, la chaleur ou les ondes radio, en énergie électrique utilisable, utile pour alimenter les équipements à faible consommation. Par exemple, Demirhan et Duman (Demirhan et Duman, 2018) ont exploré le protocole IRSA avec récupération d’énergie. Ce protocole est conçu spécifiquement pour les équipements capables de récupérer de l’énergie, permettant l’envoi de plusieurs copies. Chaque équipement possède une petite batterie, suffisante pour une seule transmission de paquet (plusieurs copies). Le modèle suppose que la batterie se recharge avec une certaine probabilité à chaque slot, indépendamment des autres slots et équipements. Il s’agit d’une approche probabiliste, où la disponibilité de l’énergie dépend de l’environnement. Une technique d’optimisation est alors employée pour ajuster la fréquence d’envoi des copies en fonction de la disponibilité d’énergie. Demirhan et Duman ont étendu leur recherche dans (Demirhan et Duman, 2019) pour inclure des batteries de capacité finie.

Pour optimiser davantage le débit du système, les chercheurs de (Su *et al.*, 2021) ont amélioré le modèle de récolte d’énergie développé dans (Demirhan et Duman, 2019), en exploitant le domaine de puissance et en intégrant la diversité de puissance. En utilisant cette diversité de puissance et un décodeur basé sur le processus SIC, il devient possible de décoder simultanément plusieurs paquets transmis en collision, notamment lorsque des différences de puissance existent entre les équipements. Une analyse asymptotique est développée dans (Akyildiz *et al.*, 2021), prenant en compte la nature stochastique des arrivées d’énergie.

Cependant, ces études (Demirhan et Duman, 2018; Demirhan et Duman, 2019; Su *et al.*, 2021; Akyildiz *et al.*, 2021) n’envisagent pas des équipements capables de conserver leur énergie dans une trame pour l’utiliser dans les trames futures, ce qui a motivé l’approche de (Li et Chin, 2022). Cette approche suppose une disponibilité indépendante de l’énergie pour

chaque trame, et considère que les équipements peuvent accumuler de l'énergie d'une trame à l'autre. L'état énergétique de chaque équipement dépend ainsi de son activité dans les trames précédentes, introduisant un couplage entre les trames. Un processus de décision markovien, à la fois basé sur un modèle et sans modèle, est développé. En outre, les chercheurs de ce travail introduisent les premières solutions d'apprentissage par renforcement, permettant aux équipements de déterminer de manière autonome le nombre optimal de copies à transmettre dans chaque trame en fonction de leur niveau d'énergie disponible.

La performance en termes d'efficacité énergétique a également été étudiée dans (Chen *et al.*, 2022). Ce travail vise à maximiser l'efficacité énergétique en optimisant d'abord individuellement la puissance de transmission allouée aux équipements et le nombre maximal de copies envoyées. Ensuite, une optimisation conjointe de ces deux paramètres est développée. L'approche utilise une analyse par dérivées partielles et propose un algorithme itératif pour atteindre efficacement l'efficacité énergétique maximale que le système peut obtenir.

Les auteurs (Haghighat et Duman, 2023) ont proposé un système IRSA aidé par des retours (en anglais, *feedback-aided*) qui réduit la consommation d'énergie en arrêtant les transmissions une fois que les paquets sont correctement décodés. La trame MAC est divisée en plusieurs sous-trames dont les équipements transmettent pendant une sous-trame, puis attendent un signal de retour avant de décider de transmettre d'autres copies dans la sous-trame suivante. Après chaque sous-trame, le décodeur effectue un décodage provisoire et diffuse un signal de retour indiquant les slots résolus (c.-à-d., les slots où toutes les copies transmises ont été décodées avec succès). Si un équipement détecte que son paquet a été décodé (indiqué par le retour), il cesse de transmettre pour le reste de la trame MAC. Cette approche réduit les transmissions de copies inutiles, augmentant ainsi l'efficacité énergétique. L'efficacité énergétique est également explorée dans les systèmes satellitaires par (Recayte *et al.*, 2024).

L'âge de l'information (en anglais, *age of information* ou AoI) mesure la 'fraîcheur' des données reçues dans un système de communication. Cette métrique permet d'évaluer la latence du point de vue des récepteurs, en mesurant le temps écoulé entre la génération d'un paquet

par l'émetteur et sa réception. Un ensemble de travaux examine également la performance en AoI dans le cadre du protocole IRSA. Par exemple, Munari et Frolov (Munari et Frolov, 2020) ont proposé un modèle d'accès aléatoire dans lequel les équipements, activés selon un processus stochastique, échantillonnent les paquets dans la première trame et transmettent leurs copies dans la trame suivante. Dans ce contexte, les auteurs ont obtenu une expression approximative pour l'âge moyen de l'information (en anglais, *average AoI*) ou *AAoI*. Par la suite, Munari a introduit une chaîne de Markov dans (Munari, 2021) pour analyser le comportement de l'AAoI en fonction du taux de perte de paquets. Ces travaux sont les premiers à analyser la performance de l'âge d'information dans IRSA. Cependant, la minimisation de l'âge de l'information moyen dans l'IRSA n'est pas abordée. Ce sujet est étudié dans (Saha *et al.*, 2021), où un modèle avec un nombre fixe d'équipements est développé. Ces équipements sont divisés en deux types selon le point temporel d'échantillonnage pour chaque équipement. La méthode principale consiste à minimiser l'AAoI en appliquant le processus SIC à chaque slot plutôt qu'à la fin de la trame. Cependant, ce travail ne prend pas en compte les modèles d'activation (c.-à-d., les équipements sont activés avec une probabilité égale à 1) ce qui rend le système irréaliste dans certains scénarios. Dans (Huang *et al.*, 2023), les auteurs proposent le protocole G-SC-IRSA (*graph-based spatially coupled IRSA*) en adaptant le modèle d'activation proposé par (Munari, 2021). Ils introduisent :

- Un système d'accès pseudo-aléatoire vise à réduire la probabilité de collisions en contrôlant le choix des séquences de slots de transmission pour chaque équipements.
- Des trames couplées et un décodeur à fenêtre glissante pour améliorer le processus SIC.
- Une expression analytique de l'AAoI est dérivée.

La performance de l'AoI de l'IRSA est également étudiée pour les communications véhicule-à-tout (en anglais, *vehicle-to-everything*) dans (Bezmenov *et al.*, 2024)

En outre, les travaux précédents n'évaluent pas les performances de l'IRSA pour LoRaWAN, dont la première adaptation du protocole IRSA pour LoRaWAN est proposée dans (Rayess *et al.*, 2023). Ce dernier présente la méthode RALI (en anglais, *repetition in ALOHA for LoRaWAN with iteration*), qui vise à améliorer la fiabilité des réseaux LoRaWAN en combinant

les techniques IRSA et CDRSA. Toutefois, la méthode RALI n'exploite pas pleinement le potentiel de la diversité spatiale et temporelle offerte par les SFs pour le décodage conjoint. Cette limitation nous a conduits à développer notre propre approche, qui tire parti de la diversité spatiale (en envoyant simultanément des transmissions sur différents SFs) et temporelle (en exploitant les transmissions sur plusieurs slots sur le même SF) pour améliorer le processus de décodage.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'état de l'art des recherches et des améliorations proposées autour du protocole IRSA. Dans le chapitre suivant, nous introduirons notre approche.

CHAPITRE 4

LE PROTOCOLE SF-IRSA BASÉ SUR LE DÉCODAGE SPATIO-TEMPOREL

4.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre le protocole que nous avons développé, appelé SF-IRSA. Ce protocole est basé sur le protocole IRSA, détaillé dans la section 2.5.3, dans lequel nous développerons un modèle analytique permettant à un équipement d'envoyer plusieurs copies de son paquet en utilisant différents SFs. Ensuite, nous concevons un processus SF-IRSA-SIC au niveau du récepteur, capable d'effectuer à la fois un décodage temporel et spatial. En exploitant la dimension temporelle, le décodeur peut traiter des transmissions sur différents slots, ce qui lui permet de capturer et de décoder des paquets envoyés avec le même SF. La dimension spatiale, quant à elle, tire parti de l'orthogonalité des SFs, permettant au système de décoder simultanément les paquets transmis avec des SFs différents. En s'appuyant sur ces deux dimensions, le décodeur augmente les chances de récupérer au moins un paquet avec succès.

4.2 Modèle du système

De la même manière que dans la section 2.5.3, nous considérons une trame MAC composée de N slots. Nous supposons qu'il y a M équipements utilisant le protocole SF-IRSA comme méthode d'accès aléatoire, où chaque équipement a exactement un seul paquet à transmettre dans la trame MAC, qu'il s'agisse d'un nouveau paquet ou de la retransmission d'un paquet précédemment en collision. Chaque équipement transmet ℓ copies identiques de son paquet avec un ou plusieurs SFs. Chaque paquet transporte l'information des slots dans lesquels ses copies sont envoyées avec les SFs choisis, permettant ainsi à la technique SF-IRSA-SIC d'être appliquée au récepteur.

Les SFs sont supposés orthogonaux, ce qui signifie que les signaux modulés avec des SFs différents peuvent coexister sur la même bande de fréquence sans interférer les uns avec les

autres (Cheikh *et al.*, 2022). Les valeurs de $\{\ell\}$ sont sélectionnées selon la distribution de probabilité $\{\Lambda_\ell\}$. Ensuite, pour chaque ℓ choisi, nous proposons une nouvelle distribution de probabilité $\{\Phi_k^\ell\}$, qui représente les probabilités qu'un équipement donné envoie les ℓ copies choisies en utilisant les SFs k , où $k \in \{1, 2, 3, \dots, K\}$.

Notre étude analytique s'inspire du travail de Liva (Liva, 2011), qui modélise le mécanisme IRSA à l'aide d'un graphe bipartite (voir section 2.5.3). Cependant, dans ce travail, nous étendons ce modèle en employant plusieurs graphes bipartites. Soit $\mathbb{G} = \{\mathcal{SF}_1, \mathcal{SF}_2, \mathcal{SF}_3, \dots, \mathcal{SF}_K\}$ la collection de ces graphes bipartites, où chaque graphe bipartite $\mathcal{SF}_k = (\mathcal{E}, \mathcal{S}, \mathcal{A}_k)$ représente les transmissions de paquets avec un SF k comme illustré dans la figure 4.1.

Dans ce contexte, \mathcal{E} représente l'ensemble des nœuds d'équipements (NEs), \mathcal{S} désigne l'ensemble des nœuds de slots (NSs), et \mathcal{A}_k est l'ensemble des arêtes représentant les transmissions de paquets avec SF k . Une arête $a_{m,j,k} \in \mathcal{A}_k$ existe entre un NE $e_m \in \mathcal{E}$ et un NS $s_j \in \mathcal{S}$ si l'équipement e_m transmet une copie de son paquet dans le slot s_j avec le SF k .

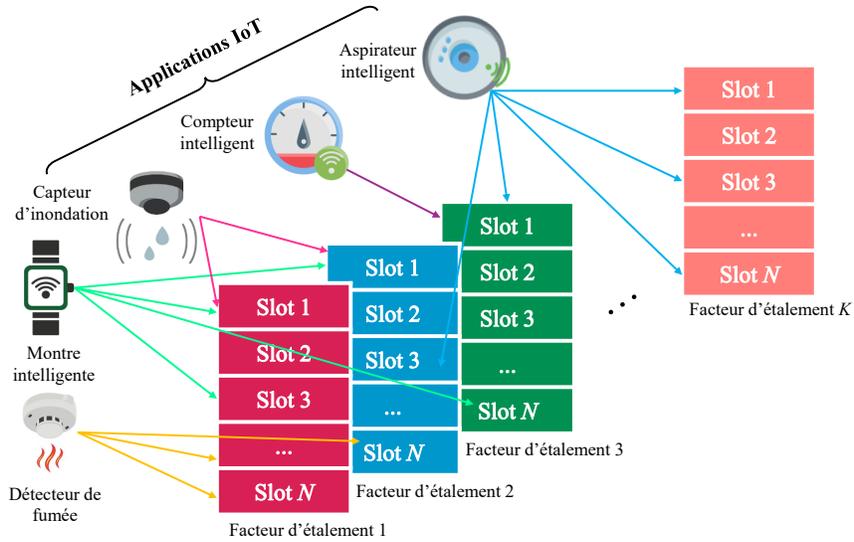


FIGURE 4.1 – Modèle LoRa basé sur l'IRSA, où chaque SF est représenté par un graphe bipartite.

4.3 Processus de décodage

Le SF-IRSA-SIC étend le processus SIC expliqué dans la section 2.5.3 pour supporter l'utilisation de multiples SFs, comme décrit dans l'algorithme 1 et illustré dans la figure 4.2 en utilisant deux SFs.

Algorithm 1 SF-IRSA avec SIC spatio-temporel (SF-IRSA-SIC)

```

1: Entrées :  $M, N, \Lambda, \mathbb{P}, \{\text{SF}_k\}_{k=1,2,\dots,K}, i_{max}$ .
2: Sortie : Débit  $T$ .
3: Initialisation :  $\mathcal{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ ;
   terminer  $\leftarrow$  Faux, itération  $\leftarrow 0$ ;
    $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}, \mathbb{G} = \{\mathcal{SF}_1, \mathcal{SF}_2, \dots, \mathcal{SF}_K\}$ ;
    $\text{Paquets\_Décodés} = \{\}, \text{Slots\_Singleton} = \{\}$ ;
4: Tant que (terminer est Faux) et itération  $< i_{max}$  faire
5:   Pour  $\mathcal{SF}_k \in \mathbb{G}$  faire
6:     Identifier les slots singletons  $\{s_n\}$ .
7:      $\text{Slots\_Singleton} \leftarrow \text{Slots\_Singleton} + \{s_n\}$ ;
8:   Fin pour
9:   Si  $\text{Slots\_Singleton} = \{\}$  alors
10:    Terminer  $\leftarrow$  Vrai.
11:   Sinon
12:    Pour  $s \in \text{Slots\_Singleton}$  faire
13:      Décoder le paquet  $P_m$  (envoyé par  $e_m$ ) dans le slot  $s$ .
14:      Soustraire toutes les copies du paquet  $P_m$ .
15:    Pour  $\mathcal{SF}_k \in \mathbb{G}$  faire
16:      Retirer les arêtes  $a_{m,j,k} \in \mathcal{A}_k, \forall s_j \in \mathcal{S}$ .
17:    Fin pour
18:     $\text{Paquets\_Décodés} \leftarrow \text{Paquets\_Décodés} + P_m$ .
19:    Fin pour
20:   Fin si
21:   itération  $\leftarrow$  itération + 1;
22: Fin tant que
23: Retourner  $T = G \left(1 - \frac{\text{len}(\text{Paquets\_Décodés})}{M}\right)$ , avec  $G = \frac{M}{N}$ .

```

L'exemple décrit dans la figure 4.2 illustre le processus de décodage à travers une représentation graphique. Dans cette représentation, chaque NE envoie ses copies vers des slots avec SF1 et SF2 (les slots sont choisis de manière aléatoire), comme montré dans la figure 4.2a. Les NEs sont placés au milieu du graphe. Les transmissions de paquets des NEs vers les NSs supérieurs représentant toutes les transmissions envoyées avec SF1 (\mathcal{SF}_1). Les transmissions des NEs vers les NSs inférieurs représentent toutes les transmissions envoyées avec SF2 (\mathcal{SF}_2).

Voici une explication détaillée de ce processus : e_1 , e_2 , e_3 , et e_4 ont envoyé respectivement 7, 5, 6, et 4 copies. Dans notre exemple, e_1 a envoyé 3 copies avec SF1 (slots supérieurs) et 4 copies avec SF2 (slots inférieurs), e_2 a envoyé 3 copies avec SF1 (slots supérieurs) et 2 copies avec SF2 (slots inférieurs), et il en est de même pour e_3 et e_4 . Les figures 4.2b et 4.2c montrent les transmissions de paquets sur les slots avec SF1 et SF2 respectivement, où les cases remplies avec un (■) représentent les copies envoyées. Le processus de décodage commence par l'identification des slots singletons, sur \mathcal{SF}_1 et \mathcal{SF}_2 . Dans notre cas, la copie de e_1 envoyée avec SF2 peut être décodée car elle s'agit d'une singleton reçue dans le slot s_1 . Ici, le décodeur a exploité le décodage spatial en considérant le second SF, qui est SF2. Une itération complète inclut les phases de décodage et de soustraction. En effet, toutes les copies envoyées par e_1 peuvent ensuite être supprimées des slots où elles ont été transmises avec à la fois SF1 et SF2, comme montré dans la figure 4.2d. Après cette itération, de nouveaux slots singletons peuvent apparaître. Par exemple, nous pouvons décoder le paquet de e_4 envoyé avec SF1 (voir figure 4.2e). Comme lors de l'itération précédente, nous pouvons supprimer toutes les copies envoyées par e_4 . La suppression des copies de e_4 rend le paquet de e_3 envoyé avec SF2 décodable et supprimable, comme montré dans les figures 4.2f et 4.2g. En procédant ainsi, les copies de e_2 envoyées avec SF1 peuvent être décodées, puis leurs copies peuvent être supprimées pour compléter le processus de décodage (voir figure (4.2h)).

4.4 Étude analytique

Suivant les mêmes étapes de la section 2.5.3, nous réintroduisons le concept de distribution de probabilité du point de vue des nœuds. Chaque NE tire un nombre aléatoire de copies ℓ

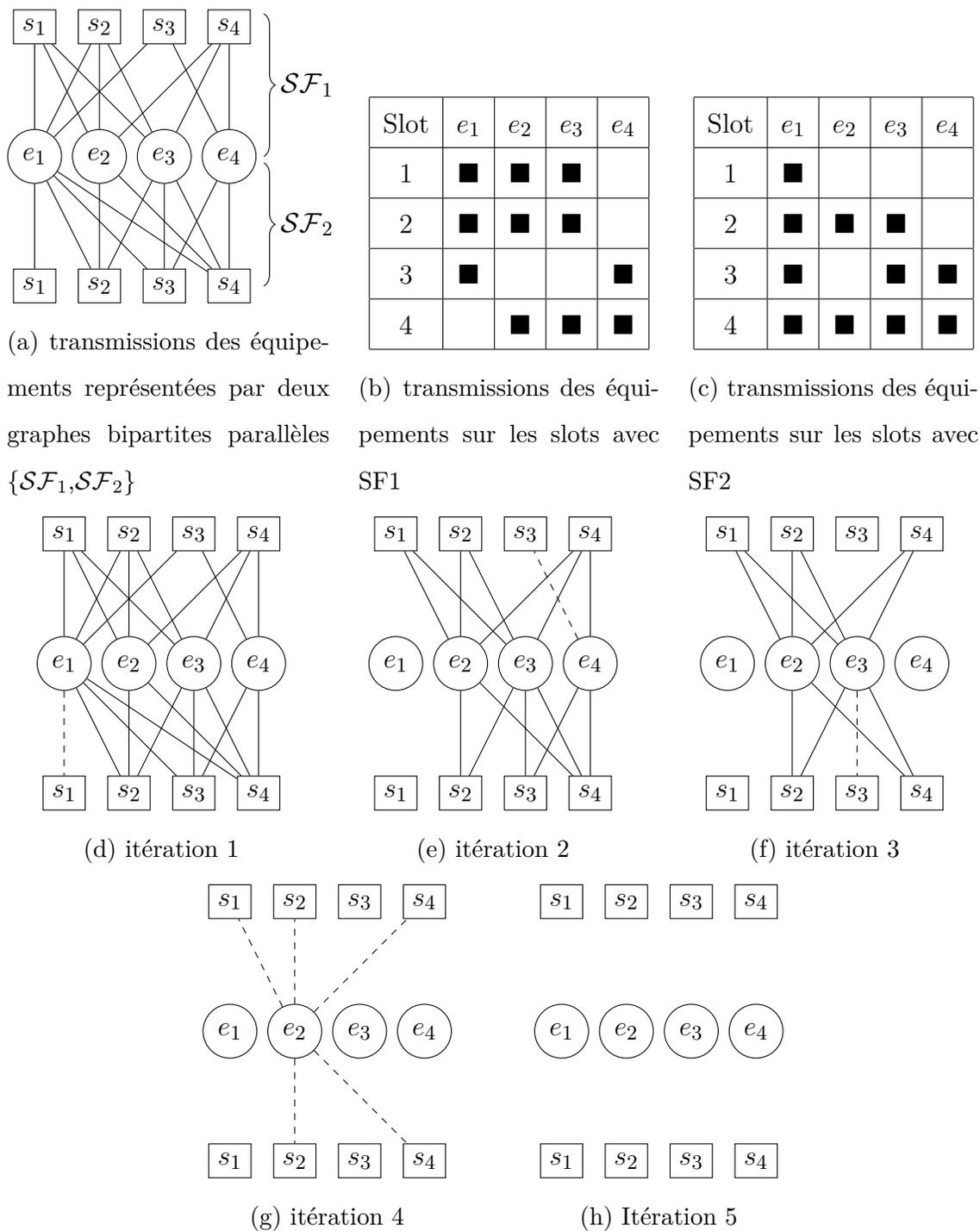


FIGURE 4.2 – Représentation graphique du processus de décodage SF-IRSA-SIC.

Légende : — copies en collision - - - - copies en décodage.

à transmettre dans une trame à partir d'une distribution de probabilité, notée $\{\Lambda_\ell\}$, où Λ_ℓ représente la probabilité qu'un équipement envoie ℓ copies. Du côté des NSs, la distribution décrivant la probabilité de recevoir ℓ copies est notée $\{\Psi_\ell\}$, avec Ψ_ℓ représentant la probabilité qu'un slot reçoive ℓ copies de paquets.

$$\Lambda(x) \triangleq \sum_{\ell} \Lambda_\ell x^\ell, \quad \text{et} \quad \Psi(x) \triangleq \sum_{\ell} \Psi_\ell x^\ell. \quad (4.1)$$

Il est important de noter que ' ℓ ' du point de vue du NE diffère de ' ℓ ' du point de vue du NS. Cependant, pour simplifier, nous avons conservé la même notation.

Nous définissons ensuite $\mathbb{P} = \{\mathcal{P}_\ell\}$ comme l'ensemble des partitions sur les SFs disponibles $\mathcal{K} = \{SF1, SF2, SF3, \dots, SFK\}$. Avec $|\mathcal{K}| = K$ représentant les SFs disponibles, \mathcal{P}_ℓ peut être considérée comme une matrice 2D où les colonnes représentent les SFs et chaque ligne est une partition possible des ℓ copies sur les K SFs. Le nombre de partitions possibles est noté N_ℓ , et $\mathcal{P}_\ell \in \mathbb{R}^{N_\ell \times K}$. Ainsi, pour toute ligne r , nous avons :

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \mathcal{P}_\ell[r, k] = \ell, \quad \forall r \in \{1, 2, \dots, N_\ell\} \quad (4.2)$$

où r représente l'indice de la ligne et k celui de la colonne correspondant à un SF.. Le tableau 4.1 illustre un exemple de partition pour $\ell = 3$ copies réparties sur 3 SFs disponibles.

Après qu'un équipement choisit d'envoyer ℓ copies, il sélectionne une partition (c'est-à-dire une ligne r) de \mathcal{P}_ℓ , qui est :

$$\mathcal{P}_\ell[r] = [\mathcal{P}_\ell[r, 1], \mathcal{P}_\ell[r, 2], \dots, \mathcal{P}_\ell[r, K]]. \quad (4.3)$$

Soit $\mathcal{K}_\ell = \{(k, \ell_k) | \ell_k \in \mathcal{P}_\ell[r]\}$, où $\ell_k = \mathcal{P}_\ell[r, k]$. De même, nous considérons que le NS reçoit ℓ copies sur un ensemble de SFs suivant $\mathcal{Q}_\ell = \{(k, \ell_k) | \ell_k \in \mathcal{Q}_\ell[r]\}$, où \mathcal{Q}_ℓ représente les partitions possibles des ℓ copies reçues sur différents SF. Ensuite, de manière similaire à (4.1), nous définissons :

$$\Phi^\ell(x) \triangleq \sum_{k \in \mathcal{K}_\ell} \Phi_k^\ell x^k, \quad \text{et} \quad \Delta^\ell(x) \triangleq \sum_{k \in \mathcal{K}_\ell} \Delta_k^\ell x^k, \quad (4.4)$$

pour les NEs et les NSs, respectivement, où $\{\Phi_k^\ell = \ell_k/\ell\}$ représente les probabilités qu'un NE envoie ses ℓ copies en utilisant les SFs $\{k \in \mathcal{K}_\ell\}$, et $\{\Delta_k^\ell = \ell_k/\ell\}$ les probabilités qu'un NS reçoive ℓ copies sur les SFs $\{k \in \mathcal{K}_\ell\}$.

TABLE 4.1 – Exemple des partitions possibles de $\ell = 3$ copies sur 3 SFs disponibles.

ℓ	SF1	SF2	SF3
$\mathcal{P}_\ell[1]$	3	0	0
$\mathcal{P}_\ell[2]$	2	1	0
$\mathcal{P}_\ell[3]$	2	0	1
$\mathcal{P}_\ell[4]$	1	2	0
$\mathcal{P}_\ell[5]$	1	1	1
$\mathcal{P}_\ell[6]$	1	0	2
$\mathcal{P}_\ell[7]$	0	3	0
$\mathcal{P}_\ell[8]$	0	2	1
$\mathcal{P}_\ell[9]$	0	1	2
$\mathcal{P}_\ell[10]$	0	0	3

Il est également important de noter que ‘ k ’ du point de vue du NE diffère de ‘ k ’ pour le point de vue du NS.

Ensuite, les représentations polynomiales des distributions du point de vue des nœuds peuvent s’exprimer comme suit :

— Pour les NEs :

$$\begin{aligned} \Gamma(x) &\triangleq \Lambda(x) \bullet \Phi(x) = \sum_{\ell} \Lambda_{\ell} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \Phi_k^{\ell} x^{\ell_k} \\ &= \sum_{\ell} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \Lambda_{\ell} \Phi_k^{\ell} x^{\ell_k}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

— Pour les NSs :

$$\begin{aligned} \Upsilon(x) &\triangleq \Psi(x) \bullet \Delta(x) = \sum_{\ell} \Psi_{\ell} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \Delta_k^{\ell} x^{\ell_k} \\ &= \sum_{\ell} \sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \Psi_{\ell} \Delta_k^{\ell} x^{\ell_k}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Soit $\{z\}$ l’ensemble des indices correspondant au nombre de copies réparties sur les SFs disponibles, c’est-à-dire $\{z\} = \{\ell_k\}_{k \in \mathcal{K}_{\ell}}$, avec $\sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \ell_k = \ell$. Il s’ensuit que $z = \ell \Phi_k^{\ell}$ pour les NEs. De même, pour les NSs, $\{z\} = \{\ell_k\}_{k \in \mathcal{K}_{\ell}}$, avec $\sum_{k \in \mathcal{K}_{\ell}} \ell_k = \ell$ et $z = \ell \Delta_k^{\ell}$.

Ainsi, les représentations polynomiales des distributions de probabilité du point de vue des nœuds peuvent être réécrites comme suit :

$$\Gamma(x) \triangleq \sum_z \Gamma_z x^z, \quad \text{et} \quad \Upsilon(x) \triangleq \sum_z \Upsilon_z x^z, \quad (4.7)$$

avec $\Gamma_z = \Lambda_\ell \Phi_k^\ell$ et $\Upsilon_z = \Psi_\ell \Delta_k^\ell$. Les dérivées de ces distributions sont données par :

$$\Gamma'(x) \triangleq \sum_z z \Gamma_z x^{z-1}, \quad \text{et} \quad \Upsilon'(x) \triangleq \sum_z z \Upsilon_z x^{z-1}. \quad (4.8)$$

Ensuite, le taux moyen de répétition sur tous les SFs, pour les NEs, s'exprime comme suit :

$$\Gamma'(1) = \sum_z z \Gamma_z = \sum_\ell \Lambda_\ell \sum_{k \in \mathcal{K}_\ell} \ell_k \Phi_k^\ell. \quad (4.9)$$

En rappelant que chaque ensemble de ℓ copies est réparti en $\{\ell_k\}_{k \in \mathcal{K}_\ell}$ sur les SFs disponibles. De manière similaire, le nombre moyen de collisions par slot (pour les NSs) est donné par :

$$\Upsilon'(1) = \sum_z z \Upsilon_z = \sum_\ell \Psi_\ell \sum_{k \in \mathcal{K}_\ell} \ell_k \Delta_k^\ell. \quad (4.10)$$

De plus, la distribution de probabilité peut être définie du point de vue des arêtes. En effet, soit λ_ℓ la probabilité qu'une arête sélectionnée au hasard dans la figure 4.1 soit connectée à un NE avec un degré ℓ . Avec ρ_z représentant la probabilité qu'une arête sélectionnée au hasard dans la figure 4.1 soit connectée à un NS ayant un degré z , ainsi :

$$\lambda_\ell = \frac{\ell \Lambda_\ell}{\sum_\ell \ell \Lambda_\ell}, \quad \text{et} \quad \rho_z = \frac{z \Upsilon_z}{\sum_z z \Upsilon_z} = \frac{\ell_k \Psi_\ell \Delta_k^\ell}{\sum_\ell \Psi_\ell \sum_{k \in \mathcal{K}_\ell} \ell_k \Delta_k^\ell}. \quad (4.11)$$

Les représentations polynomiales des distributions de probabilité du point de vue des arêtes peuvent alors s'écrire comme suit :

$$\lambda(x) \triangleq \sum_\ell \lambda_\ell x^{\ell-1}, \quad \rho(x) \triangleq \sum_z \rho_z x^{z-1}. \quad (4.12)$$

Suivant toujours (Liva, 2011), il est plus pratique de définir, utiliser et mettre à jour les probabilités moyennes sur les arêtes. Nous sélectionnons une arête au hasard dans le graphe construit \mathbb{G} , qui correspond à un NE transmettant dans un NS aléatoire, et nous définissons :

- q_i , la probabilité que l'arête connectée à un NE soit inconnue (non décodée),
- p_i , la probabilité que l'arête connectée à un NS ne soit pas encore révélée (trop de collisions),

où i représente le numéro de l'itération.

Dans le processus de décodage, un paquet d'un équipement peut être décodé avec succès si au moins une de ses copies a été décodée dans un autre slot transmis via n'importe quel SF, ce qui signifie qu'une arête associée à ce paquet a été révélée, comme mentionné dans la figure 4.3a. Ainsi, en suivant l'analyse de l'évolution de densité décrite dans (Richardson et Urbanke, 2008), la probabilité qu'une arête reste inconnue au fil des itérations est donnée par :

$$q_i = p_{i-1}^{\ell\Phi_{k'}^\ell - 1} \prod_{k \neq k'} p_{i-1}^{\ell\Phi_k^\ell} = p_{i-1}^{\ell-1}. \quad (4.13)$$

De plus, la dernière copie dans un slot donné peut être décodée si toutes les autres copies pour un SF spécifique dans ce slot de degré z , c'est-à-dire \mathcal{SF}_k) ont déjà été supprimées lors des itérations précédentes, comme est mentionné dans la figure 4.3b. Par conséquent, nous avons :

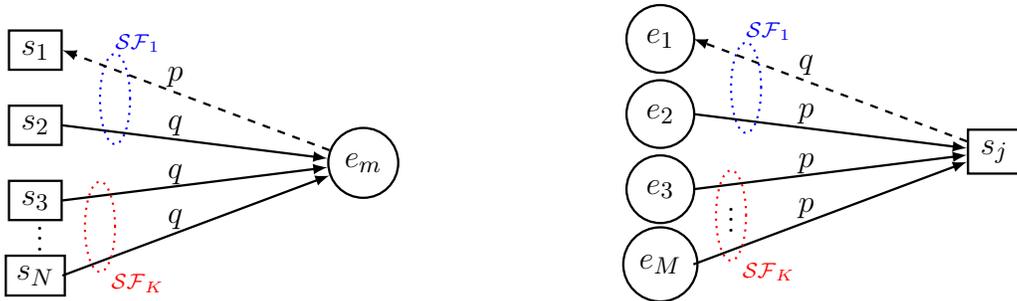
$$(1 - p_i) = (1 - q_i)^{\ell\Delta_k^\ell - 1} = (1 - q_i)^{z-1}. \quad (4.14)$$

En moyennant ces deux expressions sur les distributions des arêtes (Luby *et al.*, 1998b), nous pouvons obtenir :

$$q_i = \sum_{\ell} \lambda_{\ell} p_{i-1}^{\ell-1} = \lambda(p_{i-1}). \quad (4.15)$$

et,

$$p_i = \sum_z \rho_z (1 - (1 - q_i)^{z-1}) = 1 - \rho(1 - q_i). \quad (4.16)$$



(a) la probabilité ' q ' qu'une arête soit connectée à un NE est inconnue.

(b) la probabilité ' p ' qu'une arête connectée à un SN ne soit pas encore révélée.

FIGURE 4.3 – Représentation graphique des probabilités q et p pour SF-IRSA.

La condition initiale doit être définie comme $q_0 = p_0 = 1$ (aucune arête n'est révélée au début du processus). La précision des équations (4.15) et (4.16), lors des itérations, dépend de l'absence de boucles dans le graphe \mathbb{G} . Cette hypothèse implique des tailles de trames très grandes ($N \rightarrow \infty$), de sorte que les résultats que nous présentons dans la suite se réfèrent aux paramètres asymptotiques.

Si nous substituons l'expression pour p_i de l'équation (4.16) dans l'équation (4.15), cela donne l'équation de mise à jour itérative suivante :

$$q_i = \lambda(1 - \rho(1 - q_{i-1})). \quad (4.17)$$

Si nous itérons cette équation en commençant avec $q_0 = 1$, après I itérations, nous pouvons obtenir une valeur approximative pour la probabilité qu'une arête arbitraire soit inconnue. Si nous notons par p_I la probabilité d'échec de récupération d'une arête arbitraire connectée à un NE arbitraire après I itérations, le débit moyen après ces I itérations serait :

$$T_I = G(1 - \Lambda(p_I)), \quad (4.18)$$

où $G = \Upsilon'(1)/\Gamma'(1)$ représente la charge du réseau moyenne. Ensuite, le PLR moyen L est défini comme le rapport des équipements dont les paquets ne sont pas résolus et est donné par :

$$L = \Lambda(p_{i_{max}}). \quad (4.19)$$

ou i_{max} représente le nombre maximal d'itérations. Et, donc, le débit moyen est :

$$T = G(1 - L). \quad (4.20)$$

Dans le cadre asymptotique où $M \rightarrow \infty$, la distribution Υ_z suit une distribution de Poisson. Par conséquent, la distribution de probabilité des slots de point de vue des arêtes est donnée par :

$$\rho(x) = \frac{\Upsilon'(x)}{\Upsilon'(1)} = e^{-G\Gamma'(1)(1-x)}. \quad (4.21)$$

Dans le régime asymptotique, tous les paquets sont décodés avec une probabilité proche de 1 lorsque G est en dessous d'un certain seuil G^* . Nous pouvons définir G^* comme la valeur maximale de G telle que :

$$q > \lambda(1 - \rho(1 - q)), \quad \forall q \in (0, 1] \quad (4.22)$$

Cette condition est également représentée par le fait que $q, p \rightarrow 0$ au cours des itérations, garantissant que la probabilité d'échec diminue avec les itérations. Il peut être démontré que l'équation (4.22) peut être réécrite comme suit :

$$q > \lambda \left(1 - e^{-qG\Gamma'(1)} \right), \quad \forall q \in (0, 1] \quad (4.23)$$

Ainsi, pour des paramètres donnés Λ et \mathbb{P} , il est possible de suivre l'évolution du processus de décodage afin d'estimer le nombre de paquets décodés. Par conséquent, G^* dépend du choix de la distribution Λ et des partitions \mathbb{P} . L'objectif principal est de déterminer les valeurs de Λ et \mathbb{P} qui maximisent G^* .

Après avoir établi le cadre de décodage, nous évaluons à présent la consommation d'énergie associée à la transmission de copies sur plusieurs SFs et examinons l'impact des configurations de transmission choisies sur l'efficacité énergétique du réseau.

4.5 Efficacité énergétique

A) Rapport signal sur interférence plus bruit :

Lorsque plusieurs paquets sont reçus simultanément, la précision de la sortie du démodulateur dépend du rapport signal sur interférence (en anglais, *signal-to-interference ratio* ou SIR), qui est approximativement égal au rapport signal sur interférence plus bruit (en anglais, *signal-to-interference-plus-noise ratio* ou SINR) (Mahmood *et al.*, 2019). Un signal avec un SF k ne peut être décodé que si le SIR du signal reçu, par rapport aux signaux interférents (y compris le bruit), dépasse un certain seuil (Al-Gumaei *et al.*, 2022). Le tableau 4.2 (Goursaud et Gorce, 2015) montre les seuils SIR pour deux scénarios d'interférences : interférences inter-SF (SF différents) et interférences co-SF (même SF). Les seuils SIR les plus élevés se produisent lorsque le signal désiré et les signaux interférents utilisent le même SF. Par conséquent, un paquet peut être reçu et décodé avec succès si son SIR dépasse le seuil le plus élevé de 6 dB, quel que soit le SF (Al-Gumaei *et al.*, 2022). Nous définissons le SINR d'un équipement u transmis avec un SF k par (Magrin *et al.*, 2017) :

$$\gamma_u^k = \frac{H^k \cdot H_u \cdot P_u^k}{\sigma^2 + \sum_{u' \neq u} H_{u'} \cdot P_{u'}^k}, \quad (4.24)$$

TABLE 4.2 – Marge SIR entre le signal désiré et le signal interférant.

SIR [dB]	7	8	9	10	11	12
7	6	-16	-18	-19	-19	-20
8	-24	6	-20	-22	-22	-22
9	-27	-27	6	-23	-25	-25
10	-30	-30	-30	6	-26	-28
11	-33	-33	-33	-33	6	-29
12	-36	-36	-36	-36	-36	6

où H^k et H_u représentent respectivement le gain de traitement pour le SF k et le gain de canal pour l'équipement u . P_u^k désigne la puissance de transmission nécessaire pour chaque copie transmise par l'équipement u sur chaque SF k . Le terme de sommation représente les interférences provenant des autres équipements u' transmettant à une puissance $P_{u'}^k$, et la variance du bruit est notée σ^2 , donnée par :

$$\sigma^2 = -174 + NF + 10\log(BW), \quad (4.25)$$

où la constante (-174 dBm) représente la densité de bruit thermique, NF est le facteur de bruit du récepteur, qui est fixé pour une implémentation matérielle donnée (ici pris comme 6 dB), et BW est la bande passante utilisée.

Par simplicité et sans perte de généralité, nous supposons que la perte de propagation est prédominante. Soit μ le facteur d'affaiblissement de propagation. Ainsi, le gain de canal H_u d'un équipement u est donné par :

$$H_u = \left(\frac{c}{4\pi f d_u} \right)^\mu, \quad (4.26)$$

où c , f et d_u représentent respectivement la vitesse de la lumière, la fréquence LoRa et la distance entre l'équipement u et la passerelle LoRa.

B) Gain de traitement du SF k :

Dans notre étude, pour évaluer les performances d'un seul équipement LoRaWAN sous des

transmissions interférentes, nous considérons uniquement les interférences co-SF. L'impact des interférences inter-SF est négligeable en raison de l'orthogonalité des SFs et de la faible marge de SIR entre les différents SFs. Le gain de traitement H^k pour le SF k est donné par (Semtech Corporation, 2015) :

$$H^k = \frac{B}{R^k} = \frac{2^k}{k \cdot CR}, \quad (4.27)$$

où R^k est le débit binaire (en bits par seconde) du SF k (voir section 2.3.2, équation 2.1).

C) Portée maximale par SF k :

Soit γ_{th}^k le SINR cible du SF k . La portée D^k du SF k est donnée par la distance maximale entre la passerelle LoRa et un équipement donné u tel que $\gamma_u^k \geq \gamma_{th}^k$. Cette portée est atteinte lorsque l'équipement u transmet à la puissance maximale $P_{u,max}^k$ autorisée pour le SF k . À la distance D^k , nous avons :

$$\gamma_u^k = \gamma_{th}^k = \frac{\frac{2^k}{CR \cdot k} \cdot \left(\frac{c}{4\pi f D^k}\right)^\mu \cdot P_{u,max}^k}{\sigma^2 + \sum_{u' \neq u} \left(\frac{c}{4\pi f D_0}\right)^\mu \cdot P_{u'}^k}. \quad (4.28)$$

$$D^k = \frac{c}{4\pi f} \left\{ \frac{\frac{2^k}{CR \cdot k} \cdot P_{u,max}^k}{\gamma_{th}^k \cdot \left[\sigma^2 + \sum_{u' \neq u} \left(\frac{c}{4\pi f D_0}\right)^\mu \cdot P_{u'}^k \right]} \right\}^{\frac{1}{\mu}}. \quad (4.29)$$

où D_0 représente la distance de référence.

Nous supposons que la puissance consommée par un équipement transmettant ses copies à travers plusieurs SFs se compose de deux composantes : la puissance de transmission statique du circuit notée P_c et la puissance P_u^k . Par conséquent, la consommation énergétique moyenne pour l'équipement u est donnée par :

$$E_u = \sum_{k=1}^K \Gamma'_{u,k}(1) P_u^k + N P_c, \quad (4.30)$$

où $\Gamma'_{u,k}(1)$ représente le nombre moyen de copies transmises par un équipement u utilisant le SF k , et est défini par :

$$\Gamma'_{u,k}(1) = \sum_{\ell} \ell_k \Lambda_{u,\ell} \Phi_{u,k}^\ell. \quad (4.31)$$

D'autre part, le débit physique moyen pour un équipement u utilisant le SF k est donné par :

$$\Omega_{u,k} = R_u^k \cdot g(\gamma_u^k), \quad (4.32)$$

où $g(\cdot)$ représente la fonction d'efficacité.

Étant donné que LoRaWAN utilise CSS comme schéma de modulation, la fonction d'efficacité peut être estimée par (Al-Gumaei *et al.*, 2022) :

$$g(\gamma_u^k) = \left(1 - 0,5e^{-\alpha\gamma_u^k}\right)^{\mathcal{L}}, \quad (4.33)$$

où α est une constante qui dépend de la modulation du système et \mathcal{L} représente la taille du paquet en octets. Par la suite, le débit effectif moyen (le débit physique) pour l'équipement u devient :

$$\Omega_u = \sum_{k=1}^K \xi_k R_u^k \cdot \left(1 - 0,5e^{-\alpha\gamma_u^k}\right)^{\mathcal{L}}, \quad (4.34)$$

où ξ_k est le taux d'utilisation du SF k et est donné par :

$$\xi_k = \sum_{\ell} \Lambda_{\ell} \frac{\ell_k}{\ell} = \sum_{\ell} \Lambda_{\ell} \Phi_k^{\ell}. \quad (4.35)$$

L'efficacité énergétique pour un équipement u est obtenue en divisant l'équation (4.34) par l'équation (4.30), de la manière suivante :

$$\eta_{EE_u} = \frac{\Omega_u}{E_u} = \frac{\sum_{k=1}^K \xi_k R_{u,k} \cdot \left(1 - 0,5e^{-\alpha\gamma_u^k}\right)^{\mathcal{L}}}{\sum_{k=1}^K \Gamma'_{u,k}(1) P_u^k + N P_c}. \quad (4.36)$$

Ensuite, l'efficacité énergétique globale du réseau IoT est définie par :

$$\eta_{EE} = \frac{\sum_{u=0}^M \Omega_u}{\sum_{u=0}^M E_u} = \frac{\sum_{u=0}^M \sum_{k=1}^K \xi_k R_u^k \cdot \left(1 - 0,5e^{-\alpha\gamma_u^k}\right)^{\mathcal{L}}}{\sum_{u=0}^M \sum_{k=1}^K \Gamma'_{u,k}(1) P_u^k + N P_c}. \quad (4.37)$$

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole SF-IRSA ainsi que le processus SF-IRSA-SIC. Nous avons également décrit l'analyse analytique du protocole, permettant de comprendre le comportement du système. Par ailleurs, nous avons détaillé l'efficacité énergétique

du système, en examinant la consommation énergétique moyenne et le débit physique moyen par SF pour chaque équipement, afin d'évaluer la performance énergétique de SF-IRSA.

Dans le chapitre suivant, nous passerons aux résultats des simulations, qui permettront de valider nos analyses théoriques et de démontrer les performances du protocole SF-IRSA.

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les performances du SF-IRSA et les comparons avec les protocoles IRSA, CRDSA (qui correspond à deux répétitions régulières (Casini *et al.*, 2007)) et SA. Nous nous concentrons principalement sur les résultats de simulation en termes de débit, de taux de perte de paquets, de taux de succès et d'efficacité énergétique. Pour des raisons de comparaison et de simulation, le nombre maximal d'itérations de décodage a été fixé à $i_{max} = 20$ dans toutes les simulations présentées. La valeur $i_{max} = 20$ a été retenue afin de concilier performance de décodage et complexité raisonnable. Au-delà de ce seuil, les gains deviennent négligeables comme le montre l'étude de Liva (Liva, 2011), tandis que la charge de traitement augmente, ce qui n'est pas adapté aux réseaux contraints comme ceux de l'IoT. Les simulations sont basées sur le schéma de modulation LoRa, utilisant des SFs allant de SF7 à SF12.

5.2 Exploration des différentes probabilités de distribution

Dans la première série de simulations numériques, nous présentons dans le tableau 5.1 un exemple des valeurs de G^* calculées pour différentes distributions de $\Phi^\ell(x)$, obtenues par l'évolution différentielle (Storn et Price, 1997a). La distribution de probabilité optimale proposée par Liva (Liva, 2011), $\Lambda(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$, a été utilisée pour ce calcul et dans les prochaines simulations. Nous rappelons qu'une valeur optimale de $G^* = 0.938$ a été atteinte pour cette distribution (voir section 2.5.3, tableau 2.2).

Les lignes étiquetées par \mathcal{O}_n sont des exemples d'observations tirées de \mathbb{P} , représentant différentes distributions de $\Phi^\ell(x)$. Par exemple, la distribution \mathcal{O}_1 , la première ligne (le nombre de copies $\ell = 2$), $\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$ est interprétée comme la moitié des copies étant envoyée sur le SF7 et l'autre moitié sur le SF8. Il ressort de ce tableau 5.1 que l'utilisation de la distribution \mathcal{O}_1 donne un seuil $G^* = 1.090$, qui est presque doublé avec \mathcal{O}_3 , tandis que \mathcal{O}_4

TABLE 5.1 – Trafic offert maximal G^* sous différentes distributions.

\mathcal{O}_n	$\Phi^\ell(x)$	G^*
\mathcal{O}_1	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$ $\Phi^3(x) = x^7$ $\Phi^8(x) = x^7$	1.090
\mathcal{O}_2	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$ $\Phi^3(x) = \frac{2}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^8$ $\Phi^8(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$	1.822
\mathcal{O}_3	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$ $\Phi^3(x) = \frac{1}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^8 + \frac{1}{3}x^9$ $\Phi^8(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$	2.035
\mathcal{O}_4	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$ $\Phi^3(x) = \frac{1}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^8 + \frac{1}{3}x^9$ $\Phi^8(x) = \frac{2}{8}x^7 + \frac{2}{8}x^8 + \frac{1}{8}x^9 + \frac{1}{8}x^{10} + \frac{1}{8}x^{11} + \frac{1}{8}x^{12}$	3.044

permet d'atteindre un maximum de $G^* = 3.044$.

Selon la définition du seuil asymptotique présentée dans le section 4.4, l'équation 4.22, pour toute valeur de $G \leq G^*$, tout le trafic offert se traduit par un débit utile (c.-à-d., $L = 0$). L'utilisation de deux SFs (par exemple, \mathcal{O}_1) permet une amélioration du débit d'environ 16,2% par rapport au cas IRSA (Liva, 2011), tandis que l'extension à trois SFs (par exemple, \mathcal{O}_3) permet d'atteindre un seuil de $G^* = 2.035$, ce qui se traduit par un gain de débit de 116,9%. Le débit maximal obtenu est atteint avec l'utilisation de \mathcal{O}_4 , offrant un gain de 224,52%.

5.3 Résultats et discussion

A) *La selection des partitions* \mathbb{P} :

La figure 5.1 présente un scénario de distribution géographique des équipements LoRa répar-

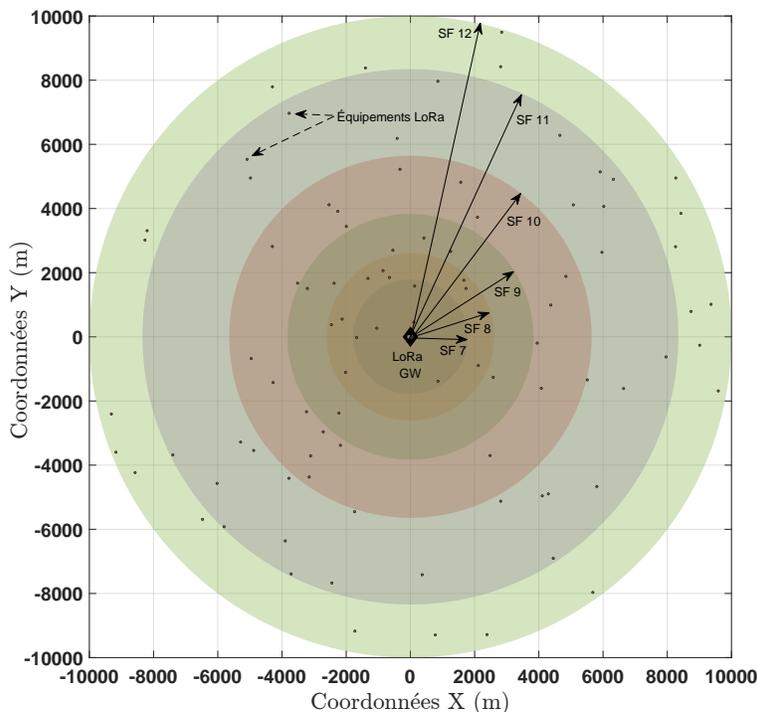


FIGURE 5.1 – Portée maximale des SFs dans un réseau LoRaWAN.

tis aléatoirement dans une zone circulaire de 10 km de rayon, représentant un environnement urbain (avec un facteur d'affaiblissement de propagation $\mu = 3$). L'objectif de cette simulation est d'illustrer comment les équipements dans un réseau LoRaWAN choisissent leurs SFs et, en conséquence, les partitions \mathbb{P} .

Le processus par lequel les équipements choisissent leurs paramètres de transmission implique deux étapes clés : (i) chaque équipement sélectionne une distribution pour le nombre de copies qu'il enverra (c.-à-d., $\Lambda(x)$), (ii) l'équipement choisit les SFs appropriés pour transmettre ces copies. La sélection des SFs est influencée par plusieurs facteurs, principalement la distance de l'équipement par rapport à la passerelle LoRa et la qualité du canal de communication (Al-Gumaei *et al.*, 2022). Dans cette simulation, l'équation (4.29) a été utilisée pour déterminer la portée maximale des SFs. Les équipements sont placés aléatoirement dans une zone géographique centrée autour de la passerelle LoRa. En fonction de leur emplacement, les équipements ont différentes options pour choisir un SF. Par exemple, les équipements situés dans le cercle du SF8 ont la flexibilité de choisir parmi les SF7, SF8 ou SF9. Ces

équipements, étant plus proches de la passerelle, peuvent utiliser des SF plus faibles, qui sont plus efficaces. (c.-à-d., des débits plus élevés et des temps de transmission réduits) (voir figures 2.7 et 2.9).

Par exemple, si un équipement choisit d'envoyer 2 copies (c.-à-d., $\ell = 2$), il peut définir \mathcal{O}_1 , $\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^8$, ce qui signifie qu'il envoie une copie avec SF7 et une copie avec SF8. D'un autre côté, les équipements situés dans le cercle du SF11, sont plus éloignés de la passerelle et subissent une qualité de canal plus faible. Par conséquent, ces équipements perdent l'avantage d'utiliser des SFs plus faibles et doivent opter pour SF11 ou SF12. Ils peuvent ainsi choisir \mathcal{O}_4 pour transmettre sur SF11 ou SF12 (Φ^8). Il est important de noter que le choix des copies et des SFs peut varier en fonction d'autres conditions du réseau.

B) *Probabilité du succès* :

La figure 5.2 illustre une évaluation comparative des taux de réussite pour les schémas SF-IRSA, IRSA, SA, et CRDSA en fonction du nombre d'équipements dans la système. La probabilité de succès est définie comme la fraction de paquets correctement décodés par rapport au nombre total de paquets transmis. Le nombre de slots est $N = 200$.

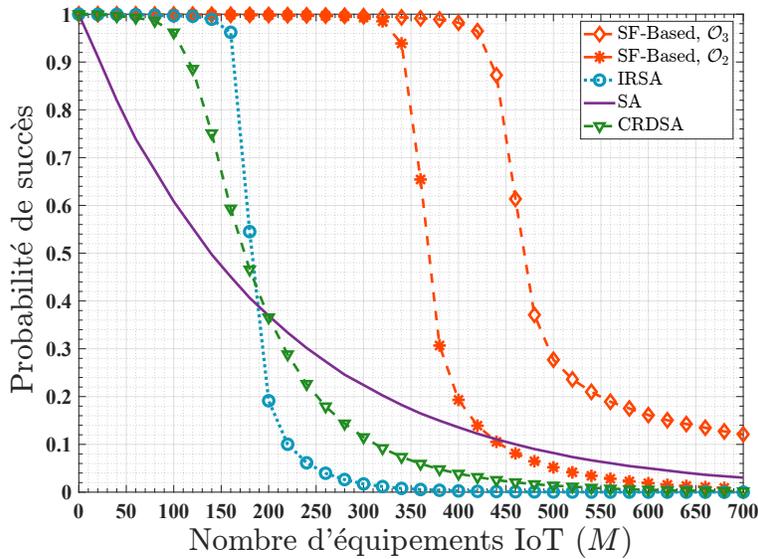


FIGURE 5.2 – Probabilité de succès sous différents schémas en fonction du M .

Plus le taux de réussite est élevé, plus le réseau est fiable. En ce qui concerne le schéma SF-IRSA basé sur \mathcal{O}_2 et \mathcal{O}_3 présenté dans la figure, nous remarquons qu'il présente un taux de réussite plus élevé que tous les schémas comparés lorsque le nombre d'équipements dépasse 150, même lorsqu'il est limité à un maximum de deux SFs pour les copies envoyées (\mathcal{O}_2). Notamment, avec la distribution \mathcal{O}_2 , le taux de réussite approche de 1 pour jusqu'à 300 équipements. En étendant à trois SFs, comme dans le cas de l'utilisation de la distribution \mathcal{O}_3 , le même taux de réussite est maintenu pour jusqu'à 400 équipements.

Nous pouvons constater que les deux courbes de SF-IRSA montrent des performances supérieures au départ, mais une baisse notable se produit lorsque le nombre de collisions devient si important que le système ne peut plus récupérer de paquets. Malgré cette baisse, elles conservent un taux de réussite supérieur à celui des autres schémas. En revanche, IRSA et CRDSA montrent tous deux des taux de réussite initiaux élevés qui diminuent après 150 et 100 équipements, respectivement, tandis que SA démontre une diminution linéaire des performances.

C) *Taux de perte de paquets :*

Dans la Figure 5.3a, nous illustrons la performance asymptotique (lorsque $N \rightarrow \infty$), en examinant le PLR, tel que défini par l'équation (4.19). Cette métrique représente la probabilité qu'une tentative de transmission échoue.

Nous rappelons que le protocole IRSA est basé sur la distribution $\Lambda(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$, tandis que SA et CRDSA, sont basés sur $\Lambda_1(x) = x$ et $\Lambda_2(x) = x^2$, respectivement. Les avantages de notre méthode proposée, sont mis en évidence dans ce contexte asymptotique. Pour toute valeur $G \leq G^* = 1.822$, tout le trafic offert est converti en débit utile, ce qui entraîne effectivement une probabilité de perte de paquets nulle, tandis que pour IRSA et CRDSA, cela est valable pour $G \leq 0.93$ et $G \leq 0.5$, respectivement. Des simulations Monte Carlo pour $N = 200$ sont présentés dans la figure 5.3b, confirmant la validité du critère d'optimisation asymptotique proposé.

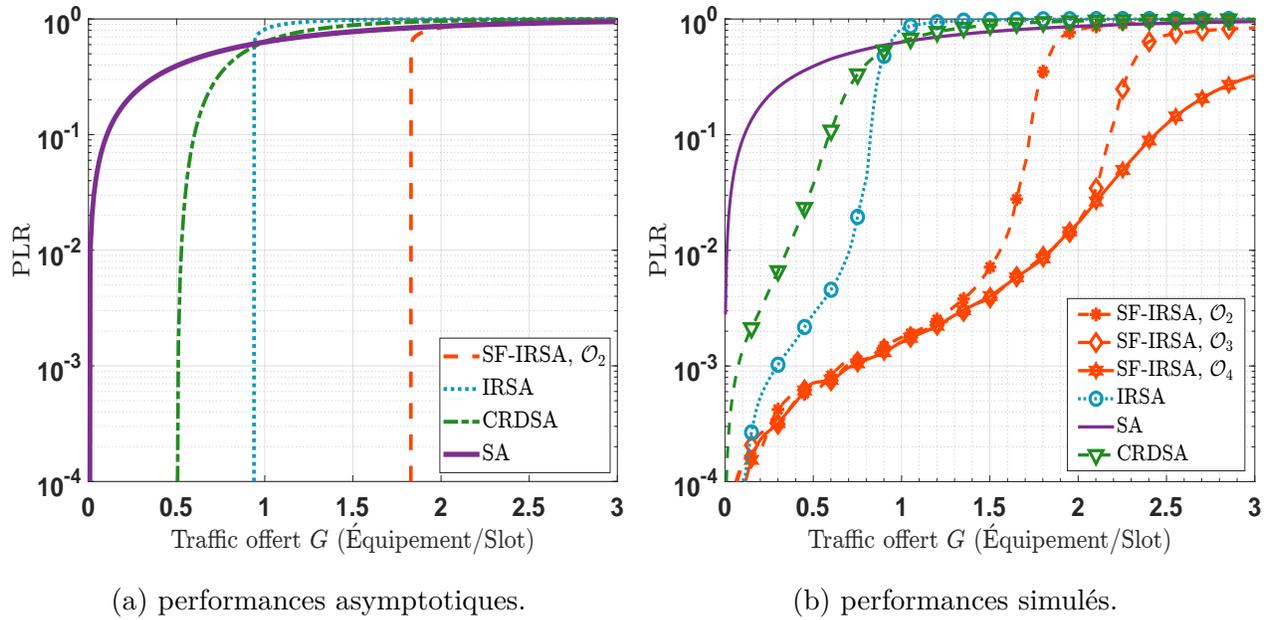
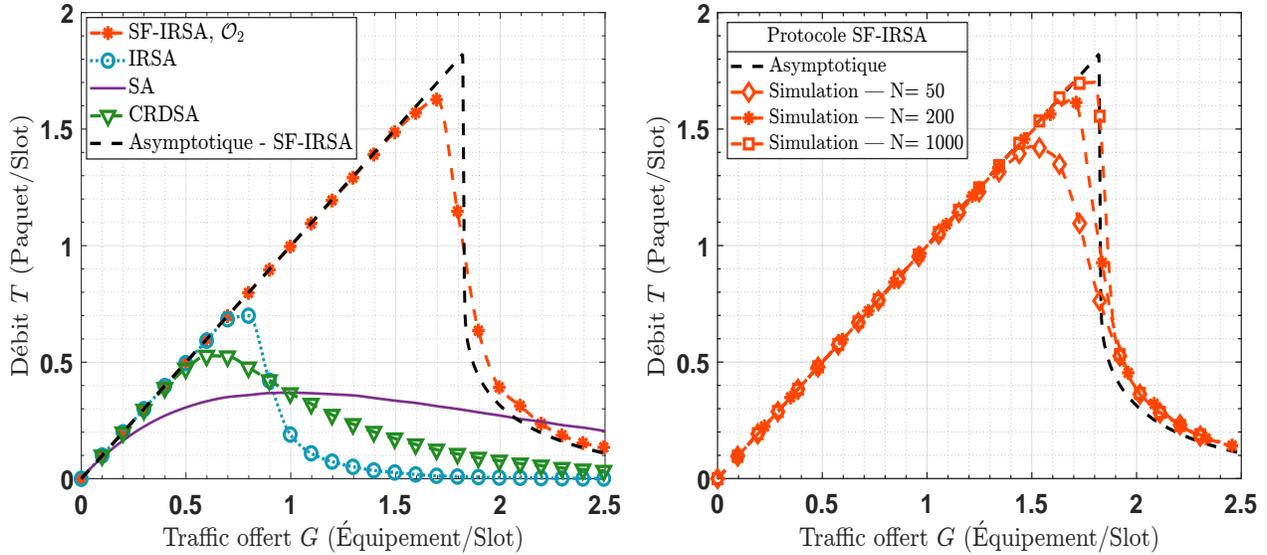


FIGURE 5.3 – Comparaison des performances en termes de taux de perte de paquets.

Les PLRs moyens pour les schémas SF-IRSA, IRSA, SA et CRDSA, sont comparés dans la figure 5.3b. Les simulations pour le schéma SF-IRSA ont été réalisées en utilisant différentes distributions : \mathcal{O}_2 , \mathcal{O}_3 et \mathcal{O}_4 . Les résultats montrent que, pour atteindre un PLR cible de 10^{-2} , le schéma SA devrait fonctionner à des charges très faibles (environ $G \approx 0.01$). En revanche, le CRDSA peut supporter une charge de trafic proche de $G \approx 0.35$, tandis que l'IRSA peut supporter des charges de trafic légèrement plus élevées, proches de $G \approx 0.7$. Le schéma SF-IRSA utilisant la distribution \mathcal{O}_2 double notablement la capacité de charge par rapport à l'IRSA pour le même PLR cible, atteignant un PLR de 10^{-2} à une charge de trafic de $G \approx 1.56$. Pour les distributions \mathcal{O}_3 et \mathcal{O}_4 , ce même objectif est atteint à $G \approx 1.86$. Une analyse plus approfondie montre qu'un PLR de 10^{-1} est atteint à $G \approx 0.72$ pour le CRDSA et $G \approx 0.83$ pour l'IRSA, tandis que le schéma SF-IRSA permet d'atteindre ce taux de perte à $G \approx 1.74$, $G \approx 2.19$ et $G \approx 2.44$ respectivement pour \mathcal{O}_2 , \mathcal{O}_3 et \mathcal{O}_4 , confirmant que plus le nombre de SFs utilisés augmente, plus le système devient efficace, avec une efficacité maximale observée pour la distribution \mathcal{O}_4 .

Si le PLR est le critère pour sélectionner la distribution des SFs, différents choix doivent être faits selon le taux de perte cible. Par exemple, lorsque l'objectif est un PLR d'environ



(a) débit simulé et asymptotique pour SF-IRSA basé sur \mathcal{O}_2 , comparé à IRSA, CRDSA, et SA. (b) débit simulé et asymptotique pour SF-IRSA basé sur \mathcal{O}_2 pour différentes tailles de trames.

FIGURE 5.4 – Comparaison des performances en termes de débit.

10^{-3} , la distribution \mathcal{O}_2 est peut être adaptée en raison de sa simplicité en n'utilisant que deux SFs, car les trois distributions atteignent cet objectif à presque $G = 0.83$. Pour un PLR cible de 10^{-2} , \mathcal{O}_3 est un choix approprié. Lorsque l'exigence du PLR est relâchée à 10^{-1} , \mathcal{O}_4 est la meilleure option. Ces observations s'appliquent avec l'utilisation de la distribution $\Lambda(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$, qui permet un maximum de 8 copies et la taille de la trame utilisée dans cet exemple (c.-à-d., $N = 200$), et peuvent varier avec des tailles de trame différentes ou d'autres distributions $\Lambda_n(x)$.

D) Débit :

Dans la figure 5.4a, le débit asymptotique et simulé du schéma SF-IRSA est évalué en utilisant \mathcal{O}_2 et comparé à l'IRSA, ainsi qu'à CRDSA et SA. Les simulations sont effectuées avec $N = 200$. En se concentrant sur le schéma SF-IRSA, les résultats de la simulation sont très proches de la courbe asymptotique, maintenant une linéarité pour $G \leq G^*$, où le débit maximal atteint $T = 1.82$ dans le cas asymptotique et environ $T = 1.63$ dans les résultats simulés. Au-delà de ce seuil (c.-à-d. $G \geq G^*$), une légère déviation est observée, en raison

de l'instabilité du système dans le cas asymptotique. Comparé à d'autres schémas, l'IRSA et CRDSA atteignent des débits maximaux d'environ $T = 0.7$ et $T = 0.6$, respectivement, tandis que SA ne dépasse pas $T = 0.37$. En revanche, le schéma SF-IRSA surpasse nettement ces derniers, atteignant un débit simulé maximal d'environ $T = 1.63$. Cette performance supérieure peut être interprétée comme la capacité du décodeur SF-IRSA-SIC à exploiter à la fois le décodage temporel et spatial. En utilisant plusieurs SFs, le système est capable de gérer des charges de trafic plus élevées et d'offrir un débit supérieur. Nous rappelons que dans le cas de SF-IRSA, le débit maximal avec une trame de $N = 200$ slots est inférieur à celui d'asymptotique ($N \rightarrow \infty$). Cependant, des tailles de trame plus longues permettent d'approcher les performances du débit simulé de celles du cas asymptotique. Les résultats de la figure 5.4b confirment ce fait. Ici, la performance de SF-IRSA est représentée pour différentes tailles de trames $N = 50, 200, 1000$. La simulation montre que le schéma bénéficie de l'adoption de trames MAC plus longues, ce qui valide également l'adaptabilité de SF-IRSA à des charges de trafic légères, moyennes et élevées.

E) *Efficacité énergétique :*

La figure 5.5a représente l'efficacité énergétique η_{EE} en fonction de la longueur des paquets \mathcal{L} , en supposant une puissance de transmission égale $P^k = 14$ dBm pour tous les SFs. L'équation (4.37) a été utilisée pour ce calcul. Les autres paramètres du simulation sont présentées dans la tableaux 5.2. Les valeurs présentées dans ce tableau ont été choisies sur la base de références issues de la littérature et de scénarios réalistes dans les réseaux LoRaWAN. Le nombre d'équipements $N = 300$ permet de simuler un réseau de densité modérée. La fréquence $f = 926$ MHz correspond à une bande ISM utilisée pour LoRa en Amérique du Nord. La distance d varie de 50 m à 10 km afin de couvrir un large éventail de cas d'usage, allant des scénarios où les équipements sont situés à proximité de la passerelle LoRa jusqu'à ceux où ils sont localisés en périphérie de la zone de couverture. Les paramètres du modèle de canal, tels que $\sigma = 1,9 \times 10^{-12}$, $\mu = 3$ et $\alpha = 1$, ont été extraits de travaux antérieurs sur la modélisation de la puissance reçue dans des environnements typiques (Al-Gumaei *et al.*, 2022; Bor *et al.*, 2016). Enfin, la puissance de circuit $P_c = 4$ dBm et la puissance

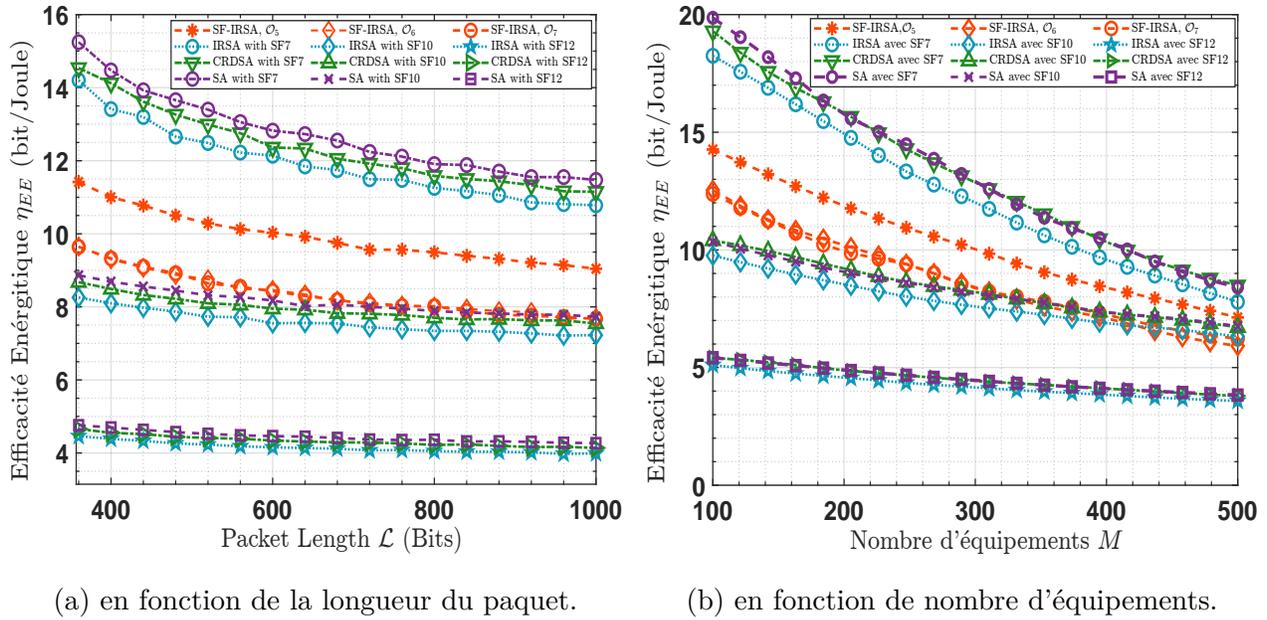


FIGURE 5.5 – Comparaison de performances en termes d'efficacité énergétique.

de transmission $P^k = 14$ dBm sont des valeurs courantes utilisées dans les simulations de performance énergétique de LoRa, conformes aux spécifications des modules commerciaux.

TABLE 5.2 – Paramètres de simulation pour l'efficacité énergétique.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
N	300	σ	$1,9 \times 10^{-12}$
f	926 MHz	μ	3
d	50 m à 10 km	α	1
P_c	4 dBm	P^k	14 dBm

Pour une comparaison équitable, les schémas IRSA, CRDSA, et SA sont évalués en utilisant SF7, SF10 et SF12 pour représenter respectivement les meilleurs, moyens et pires scénarios. Il convient de noter que des SFs plus faibles entraînent un temps de transmission plus court (voir figure 2.9), ce qui permet d'obtenir une meilleure efficacité énergétique (Al-Gumaei *et al.*, 2022)). Comme prévu, η_{EE} diminue avec l'augmentation de la longueur des paquets

en raison du coût énergétique plus élevé des transmissions plus longues. Les schémas utilisant SF7 bénéficient de temps de transmission plus courts, conduisant à une meilleure efficacité énergétique, tandis que SF10 et SF12 montrent de moins bonnes performances en raison du temps de transmission plus long.

En revanche, le schéma SF-IRSA, qui combine SF7 et SF10 (i.e., \mathcal{O}_5), SF7 et SF12 (i.e., \mathcal{O}_6), ou les trois SFs (i.e., \mathcal{O}_7) (voir tableau 5.3), maintient une η_{EE} raisonnable à travers différentes longueurs de paquets. Bien que légèrement moins efficace que les schémas avec

TABLE 5.3 – Différentes distributions utilisées pour les simulations de η_{EE} .

\mathcal{O}_n	$\Phi^\ell(x)$
\mathcal{O}_5	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^{10},$ $\Phi^3(x) = \frac{2}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^{10},$ $\Phi^8(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^{10}$
\mathcal{O}_6	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^{12},$ $\Phi^3(x) = \frac{2}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^{12},$ $\Phi^8(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^{12}$
\mathcal{O}_7	$\Phi^2(x) = \frac{1}{2}x^7 + \frac{1}{2}x^{10},$ $\Phi^3(x) = \frac{1}{3}x^7 + \frac{1}{3}x^{10} + \frac{1}{3}x^{12},$ $\Phi^8(x) = \frac{3}{8}x^7 + \frac{3}{8}x^{10} + \frac{2}{8}x^{12}$

SF7, SF-IRSA s’adapte efficacement à l’utilisation des différents SFs, obtenant une meilleure η_{EE} comparée aux schémas qui se reposent uniquement sur un seul SF (dans ce cas, SF10 et SF12). Cette adaptabilité est importante dans les déploiements pratiques, où le choix du SF dépend de la distance d’équipement par rapport à la passerelle LoRaWAN (voir figure 5.1 et l’explication associée) ainsi que de la qualité du canal (Al-Gumaei *et al.*, 2022). Les performances en termes d’efficacité énergétique observées en fonction de la longueur des paquets (\mathcal{L}) sont également valables pour les scénarios de charge faible, moyenne et élevée, comme illustré dans la figure 5.5b. Cela démontre la robustesse de l’approche, où les mêmes tendances d’efficacité énergétique se maintiennent malgré les variations dans le nombre d’équipements connectés au réseau.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances du schéma SF-IRSA et les avons comparées à celles des protocoles IRSA, CRDSA et SA à travers diverses métriques, notamment le débit, le taux de perte de paquets, le taux de réussite et l'efficacité énergétique. Les résultats de simulation montrent clairement que l'utilisation de multiples SFs permet de trouver un équilibre entre débit, fiabilité et efficacité énergétique.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS

Ce mémoire a présenté une approche innovante, nommée SF-IRSA, conçue pour améliorer la fiabilité et l'efficacité des réseaux LoRaWAN. À travers une analyse approfondie des limites des protocoles d'accès aléatoire traditionnels, tels qu'ALOHA, SA, et IRSA, il est apparu que l'utilisation des facteurs d'étalement dans LoRaWAN offrait des opportunités importantes pour réduire les collisions et optimiser les performances réseau. Toutefois, ces opportunités n'étaient pas pleinement exploitées par les variantes existantes des protocoles IRSA. En réponse à cette lacune, SF-IRSA a été développé pour tirer parti des propriétés uniques des SFs tout en incorporant les avantages des répétitions irrégulières d'IRSA.

L'approche SF-IRSA exploite deux dimensions complémentaires pour maximiser la récupération des paquets : la dimension temporelle et la dimension spatiale. La dimension temporelle repose sur l'envoi de copies de paquets dans différents slots temporels. Cela permet au système d'utiliser l'annulation successive des interférences pour décoder progressivement les paquets en fonction des informations extraites des slots précédemment décodés. Parallèlement, la dimension spatiale tire parti de l'orthogonalité des SFs pour transmettre des copies de paquets sur plusieurs SFs distincts. Cette orthogonalité garantit que les copies transmises sur différents SFs ne s'interfèrent pas, permettant ainsi un décodage simultané. En combinant ces deux dimensions, SF-IRSA-SIC optimise le processus de récupération des paquets, en minimisant les collisions et en augmentant les chances de décodage, même dans des réseaux à haute densité d'équipements.

Les résultats des simulations et de l'analyse théorique montrent que SF-IRSA surpasse les protocoles SA, CRDSA et IRSA en termes de débit, de taux de perte et d'efficacité énergétique. En particulier, les gains asymptotiques obtenus grâce à l'utilisation de plusieurs SFs sont significatifs : avec deux SFs, le débit augmente de 16,2 % par rapport à IRSA, tandis que l'utilisation de trois SFs permet un gain de 116,9%. Avec six SFs, le débit asymptotique peut être amélioré jusqu'à 224,52 %. Ces résultats confirment que l'intégration stratégique

des SFs dans le protocole IRSA offre des performances supérieures, tout en maintenant une consommation énergétique raisonnable, ce qui est essentiel pour les applications IoT.

Cependant, bien que le gain en débit atteigne 224,52 %, cela se fait au détriment de la latence. En effet, l'utilisation des SFs plus élevés (comme SF11 et SF12) implique des durées de transmission plus longues en raison de leur faible débit binaire. Ainsi, les paquets transmis avec ces SFs nécessitent plus de temps pour être envoyés et décodés, ce qui augmente le délai global de transmission. Par ailleurs, le fait d'envoyer plusieurs copies d'un même paquet sur différents SFs introduit une complexité supplémentaire au niveau de la gestion des ressources radio et du traitement au récepteur. Le récepteur doit être capable d'identifier, synchroniser et décoder ces copies réparties sur plusieurs canaux orthogonaux, ce qui peut entraîner une surcharge computationnelle et une consommation énergétique accrue. Ce compromis entre performances, latence et complexité doit être soigneusement pris en compte selon les contraintes des applications visées.

Dans le cadre des travaux futurs, nous envisageons l'intégration de techniques adaptatives afin d'optimiser en temps réel la sélection des SFs en fonction des conditions du canal. Cela permettra de maximiser encore davantage l'efficacité du réseau en adaptant dynamiquement les transmissions aux variations des caractéristiques radio. De plus, nous prévoyons d'étendre notre protocole à des scénarios IoT plus complexes, tels que les réseaux hétérogènes comportant des équipements aux capacités variées et les environnements multi-passerelles, où la coordination entre plusieurs passerelles pourrait offrir des gains supplémentaires en matière de couverture et de fiabilité.

Un autre axe important de recherche porte sur l'analyse approfondie des performances de notre approche en termes de délai de transmission et d'âge de l'information. Ces métriques sont importantes pour les applications IoT sensibles au temps, comme la surveillance en temps réel et les systèmes industriels. Nous travaillons actuellement sur une évaluation détaillée de l'impact de SF-IRSA sur ces paramètres afin de mieux comprendre son comportement dans des scénarios nécessitant une faible latence et une fraîcheur optimale des données.

Ces résultats constitueront la base d'un article destiné à un journal scientifique, renforçant ainsi la portée et l'impact de nos travaux.

RÉFÉRENCES

- 3GPP (2015). 3gpp release 13 : Analytical view, version september 9th, 2015.
https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-13_description_20150917.zip. Accessed : 2024-11-18.
- 3GPP (2024). 3gpp standards for iot.
https://www.3gpp.org/images/presentations/3gpp_standards_for_iot.pdf.
Accessed : 2024-11-18.
- Abramson, N. (1970). The aloha system : Another alternative for computer communications. Dans *AFIPS Fall Joint Computer Conference*, 281–285.
<http://dx.doi.org/10.1145/1476936.1476999>
- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. et Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40.
- Aggarwal, S. et Nasipuri, A. (2019). Survey and performance study of emerging lpwan technologies for iot applications. Dans *2019 IEEE 16th International Conference on Smart Cities : Improving Quality of Life Using ICT & IoT and AI (HONET-ICT)*, 069–073. <http://dx.doi.org/10.1109/HONET.2019.8908117>
- Akyıldız, T., Demirhan, U. et Duman, T. M. (2021). Energy harvesting irregular repetition aloha with replica concatenation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(2), 955–968. <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2020.3029387>
- Al-Gumaei, Y. A., Aslam, N., Chen, X., Raza, M. et Ansari, R. I. (2022). Optimizing power allocation in lorawan iot applications. *IEEE Internet Things J.*, 9(5), 3429–3442. <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2021.3098477>
- Analytics, I. (2024). Lpwan market overview. Accessed : 2024-11-07. Récupéré de <https://iot-analytics.com/lpwan-market/>
- Anantachaisilp, P., Muangkhom, M., Punpigul, N. et Thammawichai, M. (2020). Store and forward cubesat using lora technology and private lorawan-server. Dans *Proceedings of the Small Satellite Conference*, 1–18.
- Angrisani, L., Arpaia, P., Bonavolontà, F., Conti, M. et Liccardo, A. (2017). LoRa Protocol Performance Assessment in Critical Noise Conditions. Dans *Proceedings of the 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, 1–5., Modena, Italy.
<http://dx.doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065939>. Récupéré de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8065939>
- Berlioli, M., Cocco, G., Liva, G. et Munari, A. (2016). *Modern Random Access Protocols*,

volume 10 de *Foundations and Trends in Networking*. Now Publishers.
<http://dx.doi.org/10.1561/13000000047>. Récupéré de
<https://www.nowpublishers.com/article/Details/NET-047>

- Bezmenov, M., Munari, A., Utkovski, Z. et Stanczak, S. (2024). Age of information for v2x : Irregular repetition slotted aloha and semi-persistent scheduling. Dans *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*, 1023–1028.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10622418>
- Bizon Franco de Almeida, I., Chafii, M., Nimr, A. et Fettweis, G. (2021). Alternative chirp spread spectrum techniques for lpwans. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(4), 1846–1855.
<http://dx.doi.org/10.1109/TGCN.2021.3085477>
- Bor, M., Roedig, U., Voigt, T. et Alonso, J. M. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale? *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, 59–67. <http://dx.doi.org/10.1145/2988287.2989163>
- Buurman, B., Kamruzzaman, J., Karmakar, G. et Islam, S. (2020). Low-power wide-area networks : Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, 8, 17179–17220.
<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968057>
- Casals, L., Mir, B., Vidal, R. et Gomez, C. (2017). Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17, 2364. <http://dx.doi.org/10.3390/s17102364>. Récupéré de <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364>
- Casini, E., De Gaudenzi, R. et Del Rio Herrero, O. (2007). Contention resolution diversity slotted aloha (crdsa) : An enhanced random access scheme for satellite access packet networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(4), 1408–1419.
<http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2007.348337>
- Cheikh, I., Aouami, R., Sabir, E., Sadik, M. et Roy, S. (2022). Multi-layered energy efficiency in lora-wan networks : A tutorial. *IEEE Access*, 10, 9198–9231.
<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3140107>
- Chen, Z., Feng, Y., Tian, Z., Jia, Y., Wang, M. et Quek, T. Q. S. (2022). Energy Efficiency Optimization for Irregular Repetition Slotted ALOHA-Based Massive Access. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(5), 982–986.
<http://dx.doi.org/10.1109/LWC.2022.3151931>
- Chilamkurthy, N. S., Pandey, O. J., Ghosh, A., Cenkeramaddi, L. R. et Dai, H.-N. (2022). Low-power wide-area networks : A broad overview of its different aspects. *IEEE Access*, 10, 81926–81959. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3196182>

- Chui, M., Collins, M., Libarikian, A., Roberts, R. et Woetzel, J. (2021). The internet of things : Catching up to an accelerating opportunity. *McKinsey & Company*. Accessed : 2024-11-07. Récupéré de <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/iot-value-set-to-accelerate-through-2030-where-and-how-to-capture-it>
- Demirhan, U. et Duman, T. M. (2018). Energy-harvesting irregular repetition slotted aloha with unit-sized battery. Dans *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2018.8422090>
- Demirhan, U. et Duman, T. M. (2019). Irregular repetition slotted aloha with energy harvesting nodes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(9), 4505–4517. <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2019.2926077>
- Elzeiny, S., Edward, P. et Elshabrawy, T. (2021). Lora performance enhancement through list decoding technique. Dans *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473517>
- Feng, C., Chen, X., Chen, Z., Tian, Z., Jia, Y. et Wang, M. (2022). Irregular repetition slotted aloha scheme with multi-packet reception in packet erasure channel. Dans *2022 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC)*, 150–155. <http://dx.doi.org/10.1109/ICAIIC54071.2022.9722704>
- Filho, H. G. S., Filho, J. P. et Moreli, V. L. (2016). The adequacy of lorawan on smart grids : A comparison with rf mesh technology. Dans *Proceedings of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC)*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ISC2.2016.7580783>
- Gallager, R. G. (1963). *Low-Density Parity-Check Codes*. Cambridge, MA : M.I.T. Press.
- Ghanbarinejad, M. et Schlegel, C. (2013). Irregular repetition slotted aloha with multiuser detection. Dans *2013 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, 201–205. <http://dx.doi.org/10.1109/WONS.2013.6578348>
- Gitman, I. (1975). On the capacity of slotted aloha networks and some design problems. *IEEE Transactions on Communications*, 23(3), 305–317. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOM.1975.1092805>
- Goursaud, C. et Gorce, J.-M. (2015). Dedicated networks for iot : Phy/mac state of the art and challenges. *EAI Endorsed Trans. Internet Things*, 1(1), e3. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.26-10-2015.150597>
- Gürsu, H. M., Moroğlu, M. Ç., Vilgelm, M., Clazzer, F. et Kellerer, W. (2019). System

- level integration of irregular repetition slotted aloha for industrial iot in 5g new radio. Dans *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1–7.
<http://dx.doi.org/10.1109/PIMRC.2019.8904385>
- Gutiérrez-Gómez, A., Rangel, V., Edwards, R., Davis, J., Aquino, R., Cruz, J., Mendoza-Cano, O. et Geng, Y. (2021). A propagation study of lora p2p links for iot applications : The case of near-surface measurements over semitropical rivers. *Sensors*, 21. <http://dx.doi.org/10.3390/s21206872>
- Haghighat, J. et Duman, T. M. (2023). An energy-efficient feedback-aided irregular repetition slotted aloha scheme and its asymptotic performance analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(12), 9808–9820.
<http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2023.3273616>
- Hata, M. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29, 317–325.
<http://dx.doi.org/10.1109/T-VT.1980.23859>
- Hmedoush, I., Adjih, C., Mühlethaler, P. et Kumar, V. (2020a). On the performance of irregular repetition slotted aloha with multiple packet reception. Dans *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 557–564.
<http://dx.doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148173>
- Hmedoush, I., Adjih, C., Mühlethaler, P. et Salaün, L. (2020b). Multi-power irregular repetition slotted aloha in heterogeneous iot networks. Dans *2020 9th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless Networks (PEMWN)*, 1–6.
<http://dx.doi.org/10.23919/PEMWN50727.2020.9293078>
- Hossain, M. I. et Markendahl, J. I. (2021). Comparison of lpwan technologies : Cost structure and scalability. *Wireless Personal Communications*, 121, 887–903.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11277-021-08664-0>
- Huang, Y., Jiao, J., Wang, Y., Wu, S., Lu, R. et Zhang, Q. (2023). G-sc-irsa : Graph-based spatially coupled irsa for age-critical grant-free massive access. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(10), 9007–9021.
<http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2022.3232568>
- Huang, Y.-C., Shieh, S.-L., Hsu, Y.-P. et Cheng, H.-P. (2021). Iterative collision resolution for slotted aloha with noma for heterogeneous devices. *IEEE Transactions on Communications*, 69(5), 2948–2961.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3059778>
- Ismail, D., Rahman, M. et Saifullah, A. (2018). Low-power wide-area networks : opportunities, challenges, and directions. Workshops ICDCN '18, New York, NY,

USA. Association for Computing Machinery.
<http://dx.doi.org/10.1145/3170521.3170529>. Récupéré de
<https://doi.org/10.1145/3170521.3170529>

- Jape, S. D., Mungase, K. V., Thite, V. B. et Jadhav, D. (2023). A comprehensive analysis on 5g, iot and its impact on agriculture and healthcare. Dans *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*, 1599–1605. <http://dx.doi.org/10.1109/ICAISS58487.2023.10250552>
- Jia, H., Ni, Z., Jiang, C., Kuang, L., Guo, S. et Lu, J. (2019). Enhanced irregular repetition slotted aloha with degree distribution adjustment in satellite network. Dans *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013984>
- Jouhari, M., Saeed, N., Alouini, M.-S. et Amhoud, E. M. (2023). A survey on scalable lorawan for massive iot : Recent advances, potentials, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(3), 1841–1876. <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2023.3274934>
- Kadusic, E., Ruland, C., Hadzajlic, N. et Zivic, N. (2022). The factors for choosing among nb-iot, lorawan, and sigfox radio communication technologies for iot networking. Dans *2022 International Conference on Connected Systems & Intelligence (CSI)*, 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/CSI54720.2022.9923999>
- Khodayer Al-Dulaimi, O. M., Hassan Al-Dulaimi, M. K. et Khodayer Al-Dulaimi, A. M. (2022). Analysis of low power wireless technologies used in the internet of things (iot). Dans *2022 2nd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI)*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ICMI55296.2022.9873714>
- Lavric, A., Petrariu, A. I. et Popa, V. (2019). Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. *IEEE Access*, 7, 35816–35825. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903157>
- Li, Y. et Chin, K.-W. (2022). Energy-Aware Irregular Slotted Aloha Methods for Wireless-Powered IoT Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(14), 11784–11795. <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2021.3132006>
- Liva, G. (2011). Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted aloha. *IEEE Transactions on Communications*, 59(2), 477–487. <http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2010.120710.100054>
- LoRa Alliance (2015a). LoRaWAN V1.0 Specification. <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v10>. Accessed : Dec. 2021.
- LoRa Alliance (2015b). Lorawan : What is it ? a technical overview of lora and lorawan.

- LoRa Alliance White Paper, 1*, 1–20. Récupéré de <https://lora-alliance.org>
- LoRa Alliance (2020). LoRaWAN L2 1.0.4 Specification. [Online]. LoRa Alliance Standard TS 001-1.0.4. Récupéré de https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/
- LoRaWAN Regional Parameters (2020). *RP002-1.0.2 LoRaWAN Regional Parameters*. Version RP002-1.0.2, publié par LoRa Alliance
- Luby, M., Mitzenmacher, M. et Shokrollahi, A. (1998a). Analysis of random processes via and-or tree evaluation. Dans *Proceedings of the 9th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 364–373.
- Luby, M., Mitzenmacher, M. et Shokrollahi, A. (1998b). Analysis of random processes via and-or tree evaluation. Dans *Proc. Annu. ACM-SIAM Symp. Discrete Algorithms*, San Francisco, CA, USA.
- Lykov, Y., Paniotova, A., Shatalova, V. et Lykova, A. (2020). Energy efficiency comparison lpwans : Lorawan vs sigfox. Dans *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 485–490. <http://dx.doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468026>
- Magrin, D., Centenaro, M. et Vangelista, L. (2017). Performance evaluation of lora networks in a smart city scenario. Dans *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 1–7. <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2017.7996384>
- Mahmood, A., Sisinni, E., Guntupalli, L., Rondón, R., Hassan, S. A. et Gidlund, M. (2019). Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1425–1436. <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2018.2864681>
- Maleki, A., Nguyen, H. H., Bedeer, E. et Barton, R. (2024). A tutorial on chirp spread spectrum modulation for lorawan : Basics and key advances. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 4578–4612. <http://dx.doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3433502>
- Marini, R., Mikhaylov, K., Pasolini, G. et Buratti, C. (2022). Low-power wide-area networks : Comparison of lorawan and nb-iot performance. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(21), 21051–21063. <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2022.3176394>
- Maurya, P., Singh, A. et Kherani, A. A. (2022). A review : spreading factor allocation schemes for lorawan. *Telecommunication Systems*, 80, 449–468. <http://dx.doi.org/10.1007/s11235-022-00903-4>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. et Meyer, F. (2018). Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment : Sigfox, lorawan, and nb-iot. Dans *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*

- (*PerCom Workshops*), 197–202.
<http://dx.doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. et Meyer, F. (2019). A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>
- Mikhaylov, K., Petäjälärvi, J. et Janhunen, J. (2017). On lorawan scalability : Empirical evaluation of susceptibility to inter-network interference. Dans *Proceedings of the European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 1–6.
<http://dx.doi.org/10.1109/EuCNC.2017.7980757>
- Milarokostas, C., Tsolkas, D., Passas, N. et Merakos, L. (2023). A comprehensive study on lpwans with a focus on the potential of lora/lorawan systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 825–867.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2022.3229846>
- Munari, A. (2021). Modern random access : An age of information perspective on irregular repetition slotted aloha. *IEEE Transactions on Communications*, 69(6), 3572–3585.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3060429>
- Munari, A. et Frolov, A. (2020). Average age of information of irregular repetition slotted aloha. Dans *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355>
- Petäjälärvi, J., Mikhaylov, K., Pettissalo, M., Janhunen, J. et Iinatti, J. (2017). Performance of a low-power wide-area network based on lora technology : Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(3), 1–16. <http://dx.doi.org/10.1177/1550147717699412>
- Qin, S., Ren, G., He, Y. et Guan, D. (2024). Spatial group-based noma-irsa with adaptive degree distribution in iot-enabled wsns. *IEEE Sensors Journal*, 24(21), 35820–35831. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2024.3465233>
- Ramatryana, I. N. A., Satria, G. B. et Shin, S. Y. (2021). Adaptive traffic load in irsa-noma prioritizing emergency devices for 6g enabled massive iot. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(12), 2713–2717.
<http://dx.doi.org/10.1109/LWC.2021.3113048>
- Rayess, J. E., Khawam, K., Lahoud, S., Helou, M. E. et Martin, S. (2023). Rali : Increasing reliability in lorawan through repetition and iteration. Dans *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1–6.
<http://dx.doi.org/10.1109/WCNC55385.2023.10118962>
- Raza, U., Kulkarni, P. et Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks : An

- overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
- Recayte, E., Devaja, T. et Vukobratovic, D. (2024). Energy-efficient irregular repetition slotted aloha for iot satellite systems. Dans *2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1109–1114.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICCWorkshops59551.2024.10615362>
- Reynders, B., Meert, W. et Pollin, S. (2017). Power and spreading factor control in low power wide area networks. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6.
- Richardson, T. et Urbanke, R. (2008). *Modern Coding Theory*. USA : Cambridge University Press.
- Saha, S., Sukumaran, V. B. et Murthy, C. R. (2021). On the minimum average age of information in irsa for grant-free mmfc. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(5), 1441–1455.
<http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2021.3065065>
- Semtech Corporation (2015). *LoRa Modulation Basics*. Camarillo, CA, USA. Available online : <https://www.semtech.com> (accessed : [insert access date]).
- Shao, X., Sun, Z., Yang, M., Gu, S. et Guo, Q. (2019). NOMA-Based Irregular Repetition Slotted ALOHA for Satellite Networks. *IEEE Communications Letters*, 23(4), 624–627. <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2900319>
- Sigfox general technical overview (2017). *General Technical Overview*. Sigfox. Technical overview of Sigfox technology and network
- Sigfox radio specifications (2023). *Sigfox Device Radio Specifications v1.7*. Sigfox. Effective from May 2023
- Sinha, R. S., Wei, Y. et Hwang, S.-H. (2017). A survey on lpwa technology : Lora and nb-iot. *ICT Express*, 3(1), 14–21.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>
- Sneha, Malik, P., Sharma, R., Ghosh, U. et Alnumay, W. S. (2023). Internet of things and long-range antenna's ; challenges, solutions and comparison in next generation systems. *Microprocessors and Microsystems*, 103, 104934.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104934>.
Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141933123001783>
- Stanco, G., Botta, A., Frattini, F., Giordano, U. et Ventre, G. (2022). On the performance of iot lpwan technologies : the case of sigfox, lorawan and nb-iot. Dans *ICC 2022 -*

- IEEE International Conference on Communications*, 2096–2101.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9839078>
- Storn, R. et Price, K. (1997a). Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. Glob. Optim*, 11, 341–359.
<http://dx.doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Storn, R. et Price, K. (1997b). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Su, J., Ren, G., Zhao, B. et Li, C. (2021). Enhanced energy harvesting irregular repetition slotted aloha for wireless sensors networks. Dans *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, 1–5.
<http://dx.doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448798>
- Sultania, A. K., Blondia, C. et Famaey, J. (2021). Optimizing the energy-latency tradeoff in nb-iot with psm and edrx. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(15), 12436–12454.
<http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2021.3063435>
- Tabbane, S. (2018). Iot standards part ii : 3gpp standards. Training on Planning Internet of Things (IoT) Networks, Bandung, Indonesia. Accessed : 2024-11-18. Récupéré de <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/IoT-BDG/7.%20IoT%20Standards%20Part%20II%20-%20Sami%20Tabbane.pdf>
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Computer Networks* (4th éd.). Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.
- The Things Network (2015). *LoRaWAN Architecture*. Consulté le 11 novembre 2024
- Xu, J., Yao, J., Wang, L., Ming, Z., Wu, K. et Chen, L. (2018). Narrowband internet of things : Evolutions, technologies, and open issues. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(3), 1449–1462. <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2017.2783374>