

École polytechnique de Louvain

Smartphones reconditionnés comme passerelles maillées en milieu forestier

Évaluation expérimentale et par simulation d'une
solution BLE Coded PHY pour le système
Silvanet

Auteur: **Hugo BRUDNICKI**

Promoteurs: **David BOL, Jérôme LOUVEAUX**

Lecteurs: **Dimitri LEDERER, Thomas ANTOINE, Pol MAISTRIAUX**

Année académique 2025–2026

Master [120] : ingénieur civil électricien

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite remercier chaleureusement les professeurs David Bol et Jérôme Louveaux pour leur disponibilité, leur écoute et l’intérêt qu’ils ont porté à mon travail. Nos réunions régulières m’ont beaucoup aidé à avancer et m’ont poussé à chercher, à chaque étape, la solution la plus pertinente au défi étudié dans ce mémoire. J’ai également beaucoup apprécié leur volonté constante de m’aider à approfondir les différents sujets abordés et à mieux comprendre les enjeux qui se cachaient derrière chacun d’eux.

Je tiens aussi à remercier sincèrement Pol Maistriaux et Thomas Antoine, qui ont toujours répondu présents lorsque j’avais besoin d’aide. Leurs conseils, leurs remarques et les connaissances qu’ils m’ont transmises ont joué un rôle important dans la réalisation de ce travail.

Un immense merci également à mes parents, qui m’ont soutenu tout au long de mes études, aussi bien moralement que financièrement, y compris dans les moments où les résultats n’étaient pas tout à fait à la hauteur de nos espérances. Je remercie tout particulièrement ma mère, qui a pris le temps de relire l’intégralité de ce mémoire avec beaucoup d’attention.

Enfin, une intelligence artificielle générative a été utilisée comme outil d’aide pour structurer certaines sections, reformuler plusieurs passages et identifier de premières pistes bibliographiques. Les informations techniques, les équations et les références finalement retenues ont ensuite été vérifiées par l’auteur dans les documents cités. L’intelligence artificielle n’a donc pas été considérée comme une source scientifique.

Résumé

Les systèmes de détection des feux de forêt reposant sur des réseaux de capteurs distribués permettent de déclencher des alertes plus précoces que les approches basées sur les satellites ou les caméras, mais leur infrastructure dédiée entraîne des coûts économiques et environnementaux. Cette thèse examine si des smartphones reconditionnés pourraient remplacer une partie de la couche de passerelles maillées du système Silvanet de DRYAD. Une analyse comparative des technologies LoRaWAN, Bluetooth, Wi-Fi, Wi-Fi HaLow, LTE/5G et des solutions inter-technologiques identifie le Bluetooth 5 LE Coded PHY comme l'interface radio native la plus pratique pour la communication directe de smartphone à smartphone.

La liaison est d'abord modélisée à l'aide d'un bilan de liaison tenant compte de la propagation en espace libre, de l'atténuation due à la végétation et du bruit du récepteur. Des expériences menées avec deux smartphones Google Pixel 6 permettent ensuite de caractériser la dépendance angulaire et la portée maximale de communication des modes LE 2M, LE 1M et LE Coded PHY en utilisant les schémas de codage S=2 et S=8. Avec S=8, une portée maximale maintenue de 475 m a été mesurée en milieu ouvert et de 240 m dans une forêt à végétation clairsemée.

Ces portées expérimentales ont ensuite été intégrées dans un simulateur de couverture représentant une forêt hexagonale d'un rayon de 3 km et contenant 259 capteurs de feux de forêt. Une couverture géométrique complète a nécessité 133 relais de smartphones en utilisant la portée en milieu ouvert et 505 relais en utilisant la portée en forêt. Il a été constaté que le nombre de nœuds requis augmentait approximativement proportionnellement à l'inverse du carré de la portée radio.

Les résultats démontrent que le protocole LE Coded PHY peut fournir des liaisons locales utiles à longue portée entre smartphones. Cependant, le remplacement direct des passerelles maillées Silvanet dédiées par des smartphones communiquant exclusivement via BLE n'est pas réaliste dans la configuration étudiée, car la portée limitée impose une densité de relais excessive. Les smartphones reconditionnés semblent donc plus adaptés à des rôles locaux ou hybrides, à condition que l'autonomie énergétique, le routage multi-sauts et l'interface avec les capteurs LoRa existants soient pris en compte.

Abstract - English version

Wildfire detection systems based on distributed sensor networks can provide earlier alerts than satellite- or camera-based approaches, but their dedicated infrastructure entails economic and environmental costs. This thesis investigates whether refurbished smartphones could replace part of the mesh-gateway layer of DRYAD's Silvanet system. A comparative review of LoRaWAN, Bluetooth, Wi-Fi, Wi-Fi HaLow, LTE/5G and cross-technology solutions identifies Bluetooth 5 LE Coded PHY as the most practical native radio interface for direct smartphone-to-smartphone communication.

The link is first modeled through a link budget accounting for free-space propagation, vegetation attenuation and receiver noise. Experiments performed with two Google Pixel 6 smartphones then characterize the angular dependence and maximum communication range of LE 2M, LE

1M and LE Coded PHY using the S=2 and S=8 coding schemes. With S=8, a maximum maintained range of 475 m was measured in an open environment and 240 m in a sparsely vegetated forest.

These experimental ranges were subsequently introduced into a coverage simulator representing a hexagonal forest with a radius of 3 km and containing 259 wildfire sensors. Complete geometric coverage required 133 smartphone relays when using the open-environment range and 505 relays when using the forest range. The required number of nodes was found to increase approximately with the inverse square of the radio range.

The results demonstrate that LE Coded PHY can provide useful long-range local links between smartphones. However, directly replacing the dedicated Silvanet mesh gateways with smartphones communicating exclusively through BLE is not realistic in the studied configuration, as the limited range imposes an excessive relay density. Refurbished smartphones therefore appear more suitable for local or hybrid roles, provided that energy autonomy, multi-hop routing and the interface with the existing LoRa sensors are addressed.

Table des matières

Introduction	1
1 Description du projet DRYAD	7
1.1 Explication du projet Silvanet par DRYAD	7
1.1.1 Silvanet Wildfire Sensor	8
1.1.2 Silvanet Mesh Gateway	12
1.1.3 Silvanet Border Gateway	15
1.2 Explication du réseau Mesh distribué	17
1.2.1 Point de départ : Réseau LoRaWAN	17
1.2.2 Le réseau maillé	19
2 Tour d’horizon de technologies de communication sans fil natives sur smart-phone et du protocole LoRa, utilisé par la solution Silvanet de DRYAD	23
2.1 LoRa	23
2.1.1 LoRaWAN	26
2.2 Bluetooth	29
2.2.1 Bluetooth Low Energy	30
Organisation fréquentielle et couches physiques	30
Modes de communication et organisation des données	31
Événements de connexion, consommation et débit applicatif	31
Sélection de la PHY, puissance d’émission et sensibilité	33
2.2.2 Bluetooth 5 Coded PHY	34
Débit symbole et schémas de codage	34
Structure du paquet et mécanisme de codage	34
Sensibilité et gain de portée	36
Temps d’air et consommation énergétique	37
2.3 Wi-Fi	38
2.3.1 Architecture d’un réseau Wi-Fi	39
Bandes de fréquences et organisation des canaux	39
Couche physique : OFDM, modulation et codage	40
MIMO, formation de faisceau et accès multi-utilisateur	41
Couche MAC et accès au médium	42
Découverte, association et échange de données	43
Consommation énergétique et portée	43
Sécurité des réseaux Wi-Fi	44
2.3.2 Évolution des principales générations	44
Wi-Fi 7 et IEEE 802.11be	45
2.3.3 Wi-Fi HaLow	46
Couche physique de Wi-Fi HaLow	47
Adaptations de la couche MAC	47
Performances expérimentales	48
Intérêt et limites pour le mémoire	48

2.4 Réseaux cellulaires LTE et 5G	49
2.4.1 Principes communs aux réseaux cellulaires	50
2.4.2 Fonctionnement du réseau LTE	51
Architecture et gestion de la connexion	51
Grille temps-fréquence et OFDMA	51
SC-FDMA en liaison montante	52
Modulation, codage, HARQ et MIMO	52
2.4.3 Fonctionnement du réseau 5G	53
Architecture, services et déploiements	53
Numérologie flexible et forme d'onde	53
Codage et adaptation de la transmission	54
Massive MIMO et formation de faisceau	54
2.4.4 Comparaison entre LTE et 5G NR	55
2.4.5 Intérêt dans le cadre de ce mémoire	55
2.5 Technologies hybrides	56
2.5.1 Communication hybride BLE-LoRa : le système BoRa	56
2.5.2 Communication hybride Wi-Fi-LoRa : les systèmes Wi-Lo et WiRa	58
2.6 Comparaison et choix de technologie	60
3 Modélisation et caractérisation expérimentale d'une liaison BLE Coded PHY	65
3.1 Bilan de liaison	65
3.1.1 Émission	66
3.1.2 Propagation	67
3.1.3 Réception	69
3.2 Bruit et métriques de performance	70
3.3 Caractérisation angulaire expérimentale de la liaison BLE	74
3.4 Réception en fonction de la distance : mesures expérimentales	82
3.5 Bilan de liaison calibré et comparaison aux modèles théoriques	86
3.5.1 Calibration à partir des mesures en environnement dégagé	86
3.5.2 Introduction de l'atténuation due à la végétation	87
3.5.3 Comparaison avec les mesures réalisées en forêt	90
3.5.4 Atténuation excédentaire observée en forêt	92
3.5.5 Estimation de la portée à partir du modèle calibré	94
3.6 Évaluation des performances de la liaison	95
3.6.1 Mesure du SNR sur une liaison BLE	95
3.6.2 Mesure du taux de livraison des paquets sur une liaison BLE	96
3.6.3 Marge de liaison	98
4 Évaluation de la couverture	99
4.1 Cas d'étude pour simulation	99
4.2 Simulation d'un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD	100
4.3 Simulation sous contraintes de portée d'une connexion BLE Coded PHY entre smartphones	105
4.4 Étude paramétrique de la portée d'une connexion BLE Coded PHY entre smartphones	108
Conclusion	111

Table des figures

0.1 Émissions mondiales dues à la perte de couvert forestier liée aux incendies en gigatonnes de CO ₂ équivalent [1]	1
0.2 Perte mondiale de couverture forestière due aux incendies en hectares, 2001-2024 [2]	2
0.3 Boucle de rétroaction incendies-climat [2]	3
0.4 Délais de détection des feux de forêt selon différentes technologies, tels que présentés par DRYAD [5]	5
1.1 Représentation schématique d'un déploiement de la technologie Dryad [5]	8
1.2 Silvanet Wildfire Sensor (gen. 3) avec ses dimensions	9
1.3 Portée de détection de fumée du capteur Silvanet Wildfire	11
1.4 Silvanet Mesh Gateway (gen. 3) avec ses dimensions	12
1.5 Portée de communication entre une passerelle maillée Silvanet Mesh Gateway et une passerelle frontière Silvanet Border Gateway.	14
1.6 Portée de communication entre deux passerelles maillées Silvanet Mesh Gateway.	14
1.7 Silvanet Border Gateway (gen. 3) avec ses dimensions	15
1.8 Schéma des connexions de puissance et d'internet pour la passerelle Silvanet Border	16
1.9 Protocole ALOHA [14]	19
1.10 Schéma des connexions d'un terminal (ED)	21
1.11 Schéma des connexions d'une passerelle frontale (FGD)	21
1.12 Schéma des connexions d'une passerelle de bordure (BGD)	21
1.13 Schéma des connexions d'une passerelle maillée (MGD)	21
1.14 Schéma d'un réseau mesh comme défendu par le brevet [12]	22
2.1 Format de paquet de couche liaison pour la couche physique codée LE [36]	35
2.2 Encodeur de correction d'erreur directe convolutif [36]	35
2.3 Architecture générale du système BoRa [73]	56
2.4 Architecture du projet Wi-Lo [74]	58
2.5 Comparaison entre le LoRa classique et le LoRa émulé (Wi-Lo) [74]	58
2.6 Émulation LoRa avec différents protocoles Wi-Fi [75]	59
2.7 Architecture du projet WiRa [75]	59
3.1 Définitions des angles ϕ , θ et δ	75
3.2 Axe de rotations	75
3.3 Disposition de la première expérience	76
3.4 Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe z	77
3.5 Disposition de la deuxième expérience	78
3.6 Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe x	79
3.7 Disposition de la troisième expérience	80
3.8 Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe z avec une position initiale en $\theta = 90^\circ$	81

3.9	Portion du RAVeL 156 entre Virelles et Vaultx utilisée pour la première campagne de mesures	83
3.10	Résultats de la première campagne de mesures pour la puissance reçue d'une communication entre deux smartphones Google Pixel 6, le long d'un RAVeL	83
3.11	Trajet dans les bois de la deuxième campagne de mesure (le drapeau à damier se trouve à l'endroit du téléphone fixe) - Capture d'écran Strava	84
3.12	Positionnement du téléphone à 3m de hauteur	84
3.13	Résultats de la deuxième campagne de mesures pour la puissance reçue d'une communication entre deux smartphones Google Pixel 6, dans la forêt	85
3.14	Bois de Presgaux - Point de vue du téléphone fixe	85
3.15	Bois de Presgaux - Point de vue du téléphone mobile à 160 m de distance du téléphone fixe	85
3.16	Présentation des mesures expérimentales sur le RAVeL et du modèle log-distance calibré pour chaque PHY	88
3.17	Puissance reçue prédite en forêt selon les différents modèles de propagation	89
3.18	Comparaison de l'atténuation excédentaire observée en forêt avec les modèles de végétation	93
3.19	Évaluation du SNR dans différents milieux	95
3.20	Évaluation du SNR par bit dans différents milieux	96
3.21	Marge de liaison en fonction de la distance	98
4.1	Forêt théorique inscrite dans un cercle de rayon de 3 km utilisée pour les simulations	100
4.2	Simulation sous conditions de DRYAD - Placement des capteurs	101
4.3	Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Placement des passerelles maillées	101
4.4	Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Placement des passerelles frontières	102
4.5	Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Repérage des capteurs non couverts par les passerelles maillées	102
4.6	Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Illustration de la zone de couverture des capteurs	103
4.7	Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en espace libre) - Illustration	105
4.8	Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en forêt) - Illustration	106
4.9	Évolution du nombre de passerelles maillées nécessaires selon la distance entre deux passerelles, pour différentes tailles de forêt.	109
4.10	Évolution du nombre de passerelles frontières nécessaires selon la distance entre deux passerelles, pour différentes tailles de forêt.	109
4.11	Nombre de Mesh Gateways par capteur selon la distance entre deux passerelles maillées	109

Liste des tableaux

1.1 Valeurs de densité de capteurs recommandées	12
2.1 Comparaison synthétique entre Bluetooth Classic et Bluetooth Low Energy [27], [28].	33
2.2 Comparaison des principales couches physiques Bluetooth Low Energy [29, 34, 37].	38
2.3 Évolution synthétique des principales générations de Wi-Fi [41, 42, 44, 45]. . . .	45
2.4 Comparaison générale entre le Wi-Fi conventionnel et Wi-Fi HaLow [51, 44, 53], [47].	49
2.5 Comparaison générale entre LTE et 5G NR [59, 70, 60, 66, 71].	55
2.6 Comparaison multicritère de LoRaWAN et des principales variantes de Bluetooth : disponibilité, portée, consommation et possibilités de communication directe ou multi-saut.	62
2.7 Comparaison multicritère du Wi-Fi, de Wi-Fi HaLow, du LTE et de la 5G : disponibilité, portée, consommation et possibilités de communication directe ou multi-saut.	62
2.8 Comparaison multicritère de LoRaWAN et des principales variantes de Bluetooth : compatibilité Android, débit, fréquences, propagation, matériel et maturité des API.	63
2.9 Comparaison multicritère du Wi-Fi, de Wi-Fi HaLow, du LTE et de la 5G : compatibilité Android, débit, fréquences, propagation, matériel et maturité des API.	64
3.1 Définition des variables de l'équation 3.1	65
3.2 Différentes variantes du modèle MED	68
3.3 Valeurs de A_L et α pour le calcul de A_m du modèle MA selon différentes fréquences	69
3.4 Évaluation des paramètres pour le modèle NZG [81]	69
3.5 Évaluation du facteur de bruit dans la littérature pour des applications BLE . . .	72
3.6 Valeurs du $RSSI_{max}$ pour les moyennes des expériences selon l'orientation de celles-ci.	82
3.7 Distance maximale de fonctionnement de la connexion BLE selon la PHY et l'environnement (limites de la figure 3.10 et la figure 3.13)	84
3.8 Résultat des calibrations pour les quatre PHY avec $d_0 = 1$ m pour la campagne RAVeL.	87
3.9 Distances seuils prédites par les modèles forestiers	90
3.10 RMSE obtenues par rapport aux mesures forestières pour les différents modèles .	91
3.11 Résultat des calibrations pour les quatre PHY avec $d_0 = 1$ m pour la campagne forêt	91
3.12 Distances de fonctionnement estimées à partir du modèle log-distance calibré en forêt pour le LE Coded S=8	94
4.1 Simulation du scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Résultats	104
4.2 Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en espace libre) - Résultats	105
4.3 Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en forêt) - Résultats . . .	106

Acronymes

- 2G** 2nd Generation of cellular network technology. [8](#)
- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project. [49](#), [54](#)
- 4G** 4th Generation of cellular network technology. [8](#)
- 5GC** 5G Core. [53](#), [55](#)
- 5QI** 5G QoS Identifier. [55](#)
- ABP** Activation By Personalization. [27](#)
- ACK** Acknowledgement. [20](#), [22](#), [42](#), [43](#)
- ADR** Adaptive Data Rate. [26](#), [28](#)
- AMF** Access and Mobility management Function. [53](#), [55](#)
- AP** Access Point. [39](#)
- API** Application Programming Interface. [viii](#), [33](#), [46](#), [55](#), [60](#), [61](#), [63](#), [64](#), [97](#)
- ATT** Attribute Protocol. [31](#), [32](#), [97](#)
- AVHRR** Advanced Very High Resolution Radiometer. [4](#)
- AWGN** Additive White Gaussian Noise. [73](#)
- BER** Bit Error Rate. [73](#), [74](#)
- BGD** Border Gateways Device. [vi](#), [20](#)–[22](#)
- BLE** Bluetooth Low Energy. [v](#), [viii](#), [6](#), [29](#)–[31](#), [33](#), [37](#), [56](#)–[58](#), [61](#)–[63](#), [65](#), [67](#), [72](#)–[74](#), [76](#), [78](#), [83](#), [84](#), [95](#)–[97](#), [99](#), [105](#)–[108](#), [110](#)–[112](#)
- BPSK** Binary Phase-Shift Keying. [40](#), [47](#), [73](#)
- BR** Basic Rate. [29](#), [30](#)
- BSS** Basic Service Set. [39](#), [45](#)
- BSSID** Basic Service Set Identifier. [39](#)
- BW** Bandwidth. [24](#), [25](#)
- CCK** Complementary Code Keying. [40](#), [45](#), [58](#)
- CI** Coding Indicator. [34](#), [35](#)
- CP** Cyclic Prefix. [54](#), [55](#)
- CQI** Channel Quality Indicator. [53](#)
- CRC** Cyclic Redundancy Check. [25](#), [32](#), [34](#), [97](#)
- CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. [42](#)
- CSS** Chirp Spread Spectrum. [24](#), [58](#)
- CTC** Cross-Technology Communication. [56](#)
- CTS** Clear to Send. [42](#), [43](#)
- DCF** Distributed Coordination Function. [47](#)
- DFS** Dynamic Frequency Selection. [40](#)

DFT Discrete Fourier Transform. [52](#), [54](#), [55](#)
DPSK Differential Phase-Shift Keying. [30](#), [33](#)
DQPSK Differential Quadrature Phase-Shift Keying. [30](#), [33](#)
DRX Discontinuous Reception. [51](#)
DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum. [40](#), [45](#)

E-UTRAN Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network. [51](#), [55](#)
EAP Extensible Authentication Protocol. [44](#)
ED End Device. [vi](#), [21](#)
EDCA Enhanced Distributed Channel Access. [43](#), [47](#)
EDR Enhanced Data Rate. [29](#), [30](#)
eMBB Enhanced Mobile Broadband. [53](#), [55](#)
EPC Evolved Packet Core. [51](#), [53](#), [55](#)
EPS Evolved Packet System. [55](#)
ESS Extended Service Set. [39](#)

FDD Frequency-Division Duplexing. [51](#)
FEC Forward Error Correction. [34](#), [35](#), [37](#), [38](#)
FFT Fast Fourier Transform. [52](#), [57](#)
FGD Front-end Gateways Device. [vi](#), [20](#)–[22](#)
FHSS Frequency-Hopping Spread Spectrum. [30](#)

GATT Generic Attribute Profile. [31](#), [63](#), [96](#), [97](#)
GFSK Gaussian Frequency Shift Keying. [30](#), [31](#), [33](#), [73](#), [74](#)
GMSK Gaussian Minimum-Shift Keying. [73](#)
GPRS General Packet Radio Service. [8](#)

HARQ Hybrid Automatic Repeat Request. [v](#), [52](#), [53](#), [56](#)
HCI Host Controller Interface. [30](#)
HSS Home Subscriber Server. [51](#), [55](#)

IBSS Independent Basic Service Set. [39](#)
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. [iv](#), [16](#), [38](#)–[40](#), [42](#)–[49](#), [58](#), [59](#), [62](#)
IFFT Inverse Fast Fourier Transform. [52](#)
IoT Internet of Things. [4](#), [17](#), [23](#), [27](#), [33](#), [44](#), [46](#), [49](#), [60](#), [62](#), [63](#), [113](#)
IP Internet Protocol. [18](#), [20](#)–[22](#)
IP Ingress Protection code. [9](#), [13](#), [15](#), [26](#), [38](#), [43](#), [44](#), [46](#), [48](#), [49](#), [55](#), [64](#)
IR Infrarouges. [4](#)
ISM Industrielles, Scientifiques et Médicales. [10](#), [14](#), [17](#), [25](#), [29](#), [30](#), [33](#)
ITU International Telecommunications Union. [68](#)

LAN Local Area Network. [20](#)
LDPC Low-Density Parity-Check. [54](#)–[56](#)
LIDAR Light Detection And Ranging. [4](#)
LNA Low-Noise Amplifier. [72](#)
LNTA Low-Noise Transconductance Amplifier. [72](#)
LoRa Long-Range. [iv](#), [vi](#), [6](#), [8](#), [10](#), [11](#), [17](#), [18](#), [23](#)–[26](#), [28](#), [29](#), [38](#), [48](#), [56](#)–[60](#), [63](#), [111](#), [112](#)

- LoRaWAN** Long Range Wide-Area Network. [iv](#), [viii](#), [4](#), [7](#), [8](#), [10](#), [14](#), [15](#), [17](#), [29](#), [60](#), [62](#), [63](#), [111](#), [112](#)
- LPWAN** Low-Power, Wide-Area Network. [17](#), [23](#), [38](#), [43](#), [46](#), [48](#)
- LTE** Long-Term Evolution. [v](#), [viii](#), [8](#), [49](#), [56](#), [60](#), [62](#), [64](#), [111](#)
- LTE-M** Long-Term Evolution Machine Type Communication. [8](#), [15](#), [16](#)
- M2M** Machine To Machine. [15](#)
- MA** Maximum Attenuation. [viii](#), [68](#), [69](#)
- MAC** Media Access Control. [iv](#), [17](#), [20](#), [26](#), [27](#), [29](#), [38](#), [39](#), [42](#), [47](#)
- MCS** Modulation and Coding Scheme. [41](#), [44](#), [48](#), [52](#), [54](#)
- MED** Modified Exponential Decay. [viii](#), [68](#)
- MGD** Mesh Gateways Device. [vi](#), [21](#)
- MIMO** Multiple-Input Multiple-Output. [iv](#), [v](#), [41](#), [42](#), [45](#), [49](#), [52](#), [56](#)
- MLO** Multi-Link Operation. [45](#), [46](#), [49](#)
- MME** Mobility Management Entity. [51](#), [55](#)
- mMTC** Massive Machine-Type Communications. [53](#), [55](#)
- MO** Modulation Offset. [57](#)
- MODIS** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. [4](#)
- MRU** Multiple Resource Units. [45](#), [46](#)
- MSK** Minimum-Shift Keying. [73](#)
- MTU** Maximum Transmission Unit. [32](#)
- NB-IoT** Narrowband Internet of things. [8](#), [15](#), [16](#)
- NDP** Null Data Packet. [48](#)
- NF** Noise Figure. [25](#)
- NFC** Near Field Communication. [13](#), [17](#)
- NG-RAN** NG Radio Access Network. [53](#)
- NR** New Radio. [v](#), [viii](#), [49](#), [53](#), [56](#), [62](#)
- NS** Network Server. [21](#), [22](#)
- NSA** Non-Standalone. [53](#)
- NZG** Non-Zero Gradient. [viii](#), [69](#)
- OFDM** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. [iv](#), [40](#), [42](#), [45](#), [47](#), [49](#), [51](#), [52](#), [54](#), [56](#), [59](#)
- OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access. [v](#), [42](#), [45](#), [46](#), [49](#), [51](#), [55](#), [56](#)
- OTAA** Over-The-Air Activation. [27](#)
- P-GW** Packet Gateway. [51](#), [55](#)
- PAPR** Peak to Average Power Ratio. [52](#)
- PDR** Packet Delivery Ratio. [97](#), [98](#)
- PDU** Protocol Data Unit. [32](#), [34](#), [37](#), [55](#), [97](#)
- PER** Packet Error Rate. [74](#), [96](#), [97](#)
- PHY** Physical layer. [iv](#), [vii](#), [viii](#), [31](#), [34](#), [36](#), [38](#), [43](#), [45](#), [47](#), [49](#), [61](#), [63](#), [73](#), [74](#), [83](#), [84](#), [87](#), [89](#), [91](#), [92](#), [94](#), [96](#), [98](#), [99](#), [105](#), [106](#), [108](#), [110](#), [112](#)
- PoE** Power over Ethernet. [8](#), [15](#), [16](#)
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation. [40](#), [41](#), [45](#), [47](#), [49](#), [52](#), [56](#), [59](#)
- QCI** QoS Class Identifier. [55](#)
- QoS** Quality of Service. [53](#), [55](#)

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying. [40](#), [47](#), [52](#)

RAW Restricted Access Window. [48](#), [49](#)

RF Radio Frequency. [18](#), [30](#)

RMSE Root Mean Square Error. [viii](#), [87](#), [90](#), [91](#), [94](#), [95](#), [112](#)

RRC Radio Resource Control. [51](#)

RSRP Reference Signal Received Power. [55](#)

RSRQ Reference Signal Received Quality. [55](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [48](#), [72](#), [76](#), [78](#), [80](#), [82](#), [83](#), [86](#), [89](#), [92](#), [94](#), [96](#), [98](#), [112](#)

RTS Request to Send. [42](#), [43](#)

RU Resource Units. [42](#), [59](#)

S-GW Serving Gateway. [51](#), [55](#)

SA Standalone. [53](#)

SBG-3 Silvanet Border Gateway 3rd gen. [16](#)

SBG-3S Silvanet Border Gateway 3rd gen with Satellite connection. [15](#), [17](#)

SC-FDMA Single-Carrier Frequency Division Multiple Access. [v](#), [52](#), [55](#), [56](#)

SDK Software Development Kit. [63](#)

SF Spreading Factor. [24](#)

SFDR Spurious Free Dynamic Range. [72](#)

SIM Subscriber Identity Module. [15](#), [64](#)

SINR Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio. [50](#), [52](#), [55](#), [56](#)

SMF Session Management Function. [53](#), [55](#)

SNR Signal-to-Noise Ratio. [25](#), [50](#), [59](#), [65](#), [71](#), [74](#), [95](#), [96](#)

SSID Service Set Identifier. [39](#), [43](#), [44](#)

STA Station. [39](#)

TDD Time-Division Duplexing. [51](#)

TWT Target Wake Time. [43](#), [45](#), [48](#), [49](#)

UDM Unified Data Management. [53](#), [55](#)

UE User Equipment. [49](#)

UPF User Plane Function. [53](#), [55](#)

URLLC Ultra Reliable and Low Latency Communications. [53](#), [55](#)

USRP Universal Software Radio Peripheral. [59](#)

UV Ultraviolet. [9](#), [13](#)

VOC Volatile Organic Compounds. [9](#)

WAN Wide Area Network. [20](#)

WLAN Wireless Local Area Network. [20](#), [45](#), [49](#)

WSN Wireless Sensor Networks. [4](#)

WUI Wildland Urban Interface. [11](#), [12](#), [99](#)

Introduction

Depuis 2023, le phénomène qui a causé le plus d'émissions de dioxyde de carbone équivalent liées à la perte de la couverture forestière, ce sont les feux de forêts. Les incendies se sont multipliés à travers le monde libérant plus de 4 Gt de gaz à effet de serre chaque année [1]. Cela comprend le dioxyde de carbone stocké dans les arbres ainsi que le méthane et l'oxyde nitreux issus de la combustion. Toute cette émission de gaz à effet de serre représente un tiers des émissions annuelles de la Chine, soit une hausse de 2.5 fois ce que les forêts rejettent habituellement.

La figure 0.1 représente l'évolution des émissions de gaz à effets de serre dues à la perte du couvert forestier liée aux incendies depuis l'année 2001. On observe alors facilement les impacts importants des années 2023 et 2024.

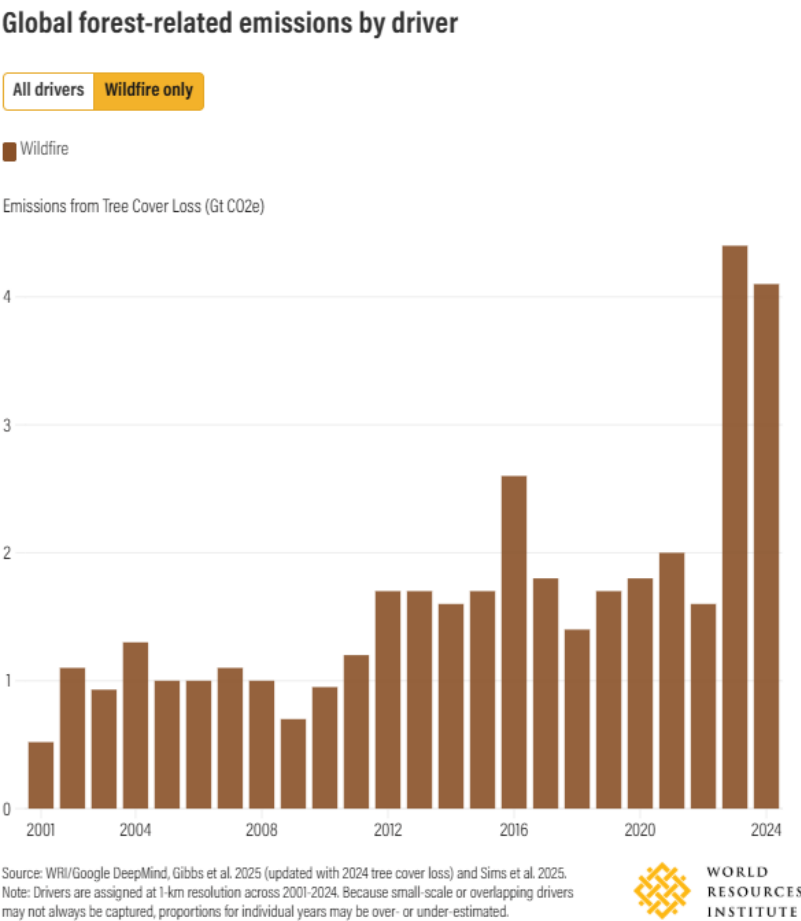


FIGURE 0.1 – Émissions mondiales dues à la perte de couvert forestier liée aux incendies en gigatonnes de CO₂ équivalent [1]

Comme on vient de le mentionner, les feux de forêts gagnent en ampleur et en proportion. Et

ce, partout dans le monde, puisque ces feux de forêts ont touché en 2024 aussi bien les forêts tropicales du Brésil et de la Bolivie que les forêts boréales du Canada et de la Russie. Ces quatre régions ont tout simplement connu leurs pires saisons d'incendies depuis le début de la surveillance satellite en 2001.

D'après des études menées par des chercheurs de l'université du Maryland, les feux de forêts détruisent désormais chaque année plus de 2 fois plus de couverture forestière qu'il y a vingt ans. Cette augmentation de l'activité des incendies est particulièrement visible ces dernières années, comme on peut le voir sur le graphe suivant (Fig. 0.2).

Global tree cover loss due to fires, 2001-2024

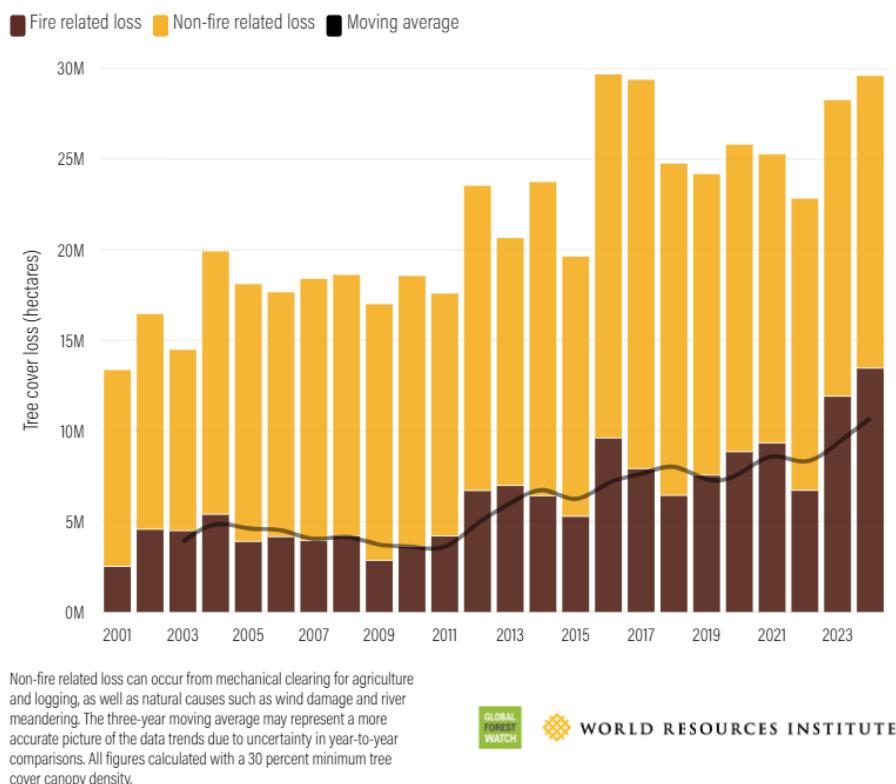


FIGURE 0.2 – Perte mondiale de couverture forestière due aux incendies en hectares, 2001-2024 [2]

On constate effectivement, sur ce même graphe, que quatre des cinq pires années enregistrées en matière d'incendie ont eu lieu depuis 2020. 2024 a été la plus extrême d'entre elles avec au moins 13.5 millions d'hectares de forêt brûlés, soit une superficie équivalente à celle de la Grèce. Ce chiffre dépasse de 13 pourcents environ le record établi l'année précédente (en 2023), qui était de 11.9 millions d'hectares [2].

Il n'y a pas que les forêts qui sont impactées par ces incendies de grande ampleur. Ces feux de forêts détruisent des maisons et autres infrastructures urbaines, polluent l'eau potable de certains puits, causent des milliards de dollars de dégâts matériels. Dans une étude rapportée par *The Lancet* [3], on estime qu'environ 1.5 million de personnes décèdent chaque année à cause des incendies (impacts des fumées toxiques pris en compte).

Les feux de forêt gagnent en intensité et causent des dégâts de plus en plus considérables. Le dérèglement du climat figure parmi les causes majeures de cette escalade. Les épisodes de canicule extrême sont désormais cinq fois plus courants qu'il y a un siècle et demi, et cette tendance devrait se renforcer avec la poursuite du réchauffement planétaire.

La hausse des températures assèche les sols et la végétation, créant ainsi des conditions favorables à des incendies plus étendus et plus récurrents. L'augmentation de la taille et de la fréquence de ces incendies entraîne donc des émissions de carbone croissantes, ce qui accentue le réchauffement et alimente un cercle vicieux souvent qualifié de « boucle de rétroaction incendies-climat » (Fig. 0.3).

Fires and the Climate Feedback Loop

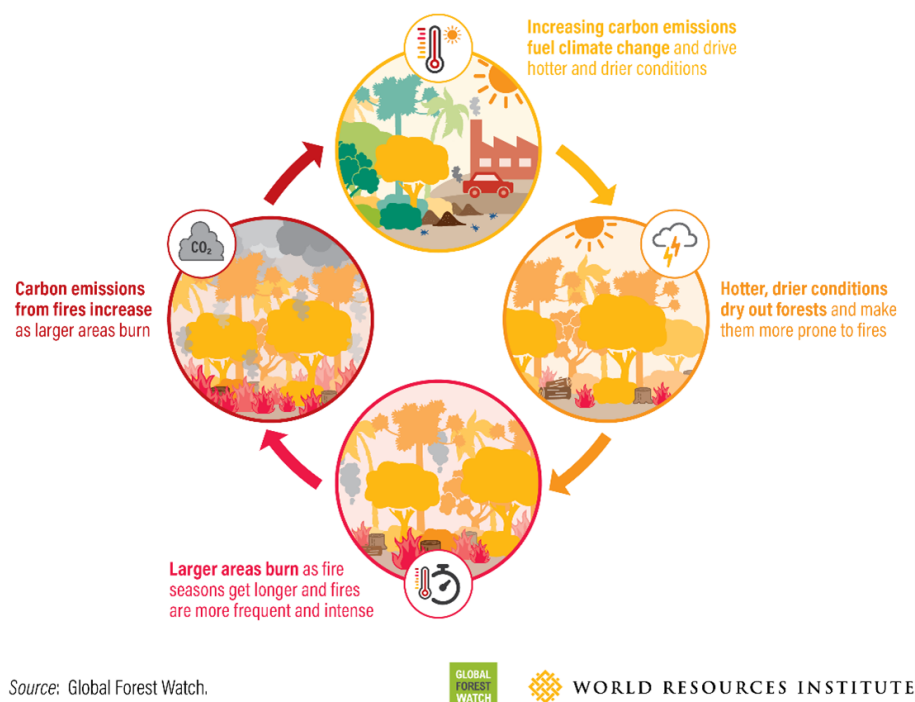


FIGURE 0.3 – Boucle de rétroaction incendies-climat [2]

Ce mécanisme, conjugué à l'étalement des activités humaines en zones boisées, explique en grande partie la multiplication des feux observée ces dernières années. À mesure que ces incendies, exacerbés par le climat, ravagent des superficies toujours plus vastes, ils affecteront un nombre croissant de populations et pèseront davantage sur l'économie mondiale.

Les facteurs à l'origine de la multiplication des incendies de forêt sont nombreux et différent d'une région à l'autre. Si la littérature scientifique aborde largement les questions de gestion des feux et de réduction des risques, aucune réponse unique ne permet à elle seule de résoudre ce problème.

Sans une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre et sans rupture du cercle vicieux entre feux et réchauffement, il sera impossible de retrouver les niveaux d'activité ignifère d'autrefois. Limiter les conséquences les plus graves du changement climatique reste envisageable, mais cela implique des transformations profondes et rapides dans l'ensemble des secteurs d'activité humaine.

Au-delà du climat, les activités humaines exercent une pression croissante sur les espaces forestiers, les rendant davantage exposés aux incendies. Dans les zones tropicales comme ailleurs, la déforestation et la dégradation des forêts constituent des facteurs aggravants majeurs. Renforcer la résilience de ces écosystèmes passe donc par la préservation du couvert forestier, mais aussi par un meilleur contrôle des pratiques à risque à proximité des forêts, notamment en période de

sécheresse. La sensibilisation du grand public aux dangers des incendies et à leurs répercussions environnementales représente également un levier essentiel pour en diminuer le nombre et la gravité.

Enfin, la technologie offre des perspectives prometteuses en matière de détection précoce des feux de forêt. Identifier un incendie dès ses premiers instants est un enjeu crucial, car le coût de son extinction croît de façon critique avec le temps. Des outils de surveillance et d'alerte performants constituent donc un complément indispensable aux stratégies de prévention.

Plusieurs approches ont été développées au fil du temps pour surveiller et détecter les feux de forêt, chacune présentant des avantages et des limites spécifiques [4].

La première méthode, la plus ancienne, repose sur l'observation humaine. Elle englobe aussi bien les patrouilles au sol que les tours de guet et les survols aériens. Si son coût reste relativement faible, il en va de même pour son efficacité. L'incendie doit déjà être important pour être visible parfois à plusieurs kilomètres et surtout il faut qu'il y ait du personnel au bon endroit au bon moment pour détecter rapidement le départ de feu. Ce qui n'est pas très réaliste.

La deuxième approche fait appel aux systèmes satellitaires. Les images satellitaires sont recueillies principalement par deux instruments : l'Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), lancé en 1998, et le Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), lancé en 1999. Ces satellites ne peuvent fournir des images d'une même région que tous les deux jours, ce qui constitue un délai beaucoup trop long pour la détection des incendies. De plus, la qualité des images est fortement affectée par les conditions météorologiques. Pour finir, le rayonnement optique et infrarouge émis par de petites flammes, au stade initial d'un feu, peut être trop faible pour être capté par un satellite, dont la position et l'orientation ne sont pas nécessairement optimales pour une détection précoce.

La troisième approche repose sur les caméras optiques et capteurs numériques. Différents types de dispositifs sont disponibles : caméras vidéo sensibles au spectre visible (fumée de jour, lueur de nuit), caméras thermiques Infrarouges mesurant le flux de chaleur, spectromètres IR identifiant la signature spectrale de la fumée, et systèmes LIDAR mesurant les rayons laser réfléchis par les particules de fumée. Cependant, ces systèmes ne fournissent qu'une vision en ligne de vue, où les arbres, les collines ou les montagnes peuvent bloquer le champ visuel. Pour s'affranchir d'une partie de ces obstacles, les caméras sont le plus souvent montées sur une tour pour augmenter la portée en ligne de vue. De plus, les conditions météorologiques et la vision nocturne influencent la performance des caméras. Ces systèmes sont également très coûteux, une tour-caméra pouvant valoir plus de trente mille dollars.

Enfin, les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks (WSN)) constituent la solution la plus prometteuse selon [4]. Ces capteurs, intégrés sur une même carte électronique avec une unité de traitement et un émetteur-récepteur sans fil, mesurent des paramètres physiques comme la température, la pression et l'humidité, ainsi que des paramètres chimiques tels que le monoxyde et le dioxyde de carbone. Leur avantage majeur est de permettre une surveillance en temps réel, sans nécessiter la construction de tours ni la mise en place d'infrastructures de communication complexes, et ils peuvent être déployés n'importe où, y compris dans des zones difficilement accessibles. Plusieurs projets de recherche ont exploré cette technologie.

C'est le cas de la solution proposée par DRYAD [5], une entreprise allemande qui a conçu un système de capteurs autonomes avec réseau maillé pouvant offrir une détection plus précoce, locale et distribuée, appelé Silvanet.

Ce système repose sur un réseau IoT sans-fil, basé sur le standard LoRaWAN et est donc adapté pour les longues portées, une faible consommation et un déploiement en zone isolée. Les capteurs fonctionnent à l'énergie solaire, sont autonomes et conçus pour rester sur le terrain entre 10 et 15 années sans maintenance. Ces capteurs ne détectent pas seulement la chaleur ou la fumée : ils analysent la composition de l'air (gaz comme CO, H₂, etc.), l'humidité, la

température — ce qui permet une détection dès le stade de “smoldering” (= combustion lente, pyrolyse, avant flammes visibles), réduisant considérablement le délai d’alerte.

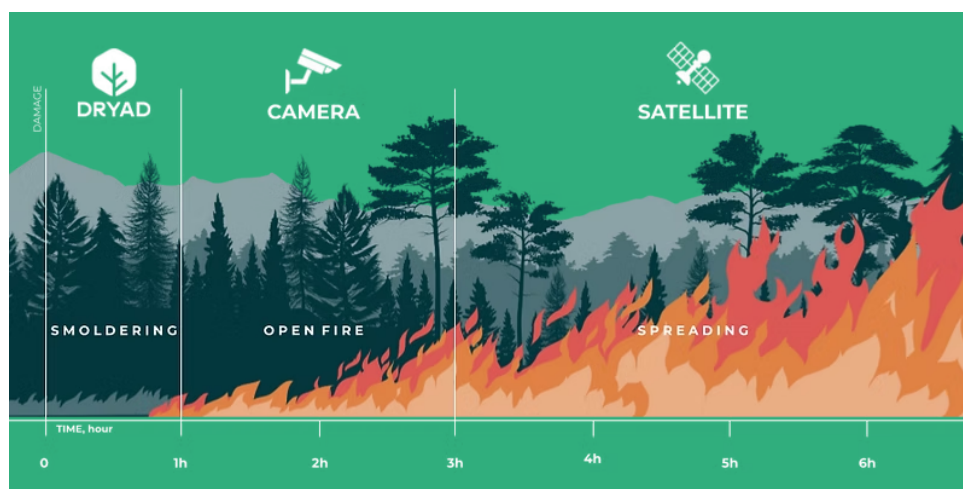


FIGURE 0.4 – Délais de détection des feux de forêt selon différentes technologies, tels que présentés par DRYAD [5]

Comme mentionné précédemment, ces systèmes de capteurs sans fil permettent une détection en temps réel entraînant des temps très courts de détection par rapport aux autres technologies utiles à la détection d’incendie. La figure 0.4, fournie par DRYAD, nous apprend que le système Silvanet peut détecter les départs d’incendie avant même l’apparition de la flamme et peut être plus rapide d’une heure vis-à-vis des systèmes de détection caméra.

Les réseaux de capteurs sans fil représentent donc aujourd’hui la voie la plus prometteuse pour une détection précoce et fiable des incendies de forêt. Des initiatives comme le projet DRYAD illustrent concrètement ce potentiel, avec des systèmes autonomes, peu énergivores et déployables dans des zones reculées. Cependant, ces infrastructures reposent sur du matériel dédié, dont la fabrication et le déploiement à grande échelle impliquent un coût économique et environnemental non négligeable. D’après [6], un capteur déployé par Dryad aurait un impact équivalent à 152 kg CO₂ eq. (il n’y a pas de données disponibles à ce jour pour l’impact équivalent d’une passerelle maillée). Dans un contexte où la lutte contre le réchauffement climatique exige une cohérence entre les objectifs et les moyens mis en œuvre, il paraît pertinent de s’interroger sur des alternatives plus durables. C’est précisément dans cette optique que s’inscrit ce travail : explorer la possibilité de remplacer les passerelles maillées (Mesh Gateways) du système Silvanet de DRYAD par des smartphones reconditionnés, prolongeant ainsi leur cycle de vie plutôt que de les laisser tomber en désuétude. Cette approche d’upcycling permettrait non seulement de réduire les déchets électroniques, mais aussi de potentiellement diminuer le coût global de déploiement du réseau. Ce travail se concentre donc sur la compréhension des technologies de communication sans fil impliquées, ainsi que sur le développement d’un prototype de communication longue distance entre deux smartphones reconditionnés Google Pixel 6, dans le but de valider la faisabilité technique de cette substitution.

La question de recherche peut-être résumée comme ceci : Dans quelle mesure des smartphones reconditionnés peuvent-ils remplacer les passerelles maillées du système Silvanet, en utilisant leurs interfaces radio natives, tout en conservant une portée et une densité de déploiement compatibles avec un réseau forestier ?

Structure

Ce document s'articule en 4 chapitres principaux.

Le chapitre 1 présente la solution développée par l'entreprise DRYAD : le projet Silvanet ainsi que le réseau maillé utilisé.

Le présent travail se penche ensuite autour des différentes technologies de communication sans fil que l'on peut retrouver dans un smartphone reconditionné ainsi que la technologie **LoRa** utilisée par le réseau DRYAD. Tout ceci constitue le chapitre 2. À l'issue de ce chapitre, la technologie **Bluetooth Low Energy** Coded PHY est identifiée comme candidate pour créer le réseau mesh entre les nouveaux dispositifs de passerelles.

Dans le chapitre 3, il s'agit de modéliser la connexion entre deux smartphones selon la technologie choisie, le **BLE** Coded PHY. Le chapitre explore aussi des paramètres de performance expérimentaux sur la connexion établie.

Enfin, le quatrième chapitre se concentre sur l'évaluation de la couverture forestière avec les paramètres étudiés lors du chapitre précédent à partir d'un cas d'étude d'une forêt fictive dans laquelle serait implémenté le réseau Silvanet..

Chapitre 1

Description du projet DRYAD

1.1 Explication du projet Silvanet par DRYAD

Comme expliqué précédemment, le système Silvanet est une solution complète dédiée à la détection ultra-précoce des feux de forêt et à la surveillance de la santé des forêts. Elle repose sur quatre composants interconnectés : le capteur de feux de forêt (Silvanet Wildfire Sensor), la passerelle maillée (Mesh Gateway), la passerelle de bordure (Border Gateway) et une plateforme cloud. Ensemble, ils forment un réseau maillé **LoRaWAN** unique, principalement alimenté par énergie solaire, capable de couvrir de larges zones forestières, y compris les plus isolées.

La rapidité de détection est au cœur du système. Chaque capteur est équipé d'une intelligence artificielle embarquée qui analyse en continu la composition de l'air — notamment le monoxyde de carbone, l'hydrogène et d'autres gaz issus de la pyrolyse — permettant d'identifier un départ de feu dès la phase de combustion lente, avant même l'apparition de flammes visibles. Des alertes géolocalisées sont alors transmises en temps réel aux équipes d'intervention, leur donnant un temps précieux pour agir avant toute propagation incontrôlable.

Au-delà de la détection d'incendies, Silvanet offre également une surveillance continue de la santé et de la croissance des forêts, fournissant aux gestionnaires forestiers des données fiables et reproductibles pour optimiser la planification, prévenir les maladies et adapter leurs interventions face à la sécheresse. Cette double fonctionnalité fait de Silvanet un outil de gestion forestière intelligente, visant à réduire les coûts de lutte contre les incendies, limiter les dommages économiques et environnementaux, et protéger aussi bien les populations que la faune sauvage.

En matière d'incendies de forêt, chaque minute compte. La détection ultra-précoce du système Silvanet a différents avantages. En plus de prévenir les pompiers dès les premières fluctuations des gaz émis par la pyrolyse, elle permet notamment de réduire considérablement les coûts de la lutte contre les incendies et de sauver vies humaines et faune sauvage.

Le réseau fonctionne en mesh distribué : c'est-à-dire que plusieurs capteurs disséminés dans la forêt vont communiquer avec des mesh gateways qui eux-mêmes vont communiquer avec d'autres mesh gateways jusqu'à atteindre des border gateways se trouvant en lisière de forêt et à portée de connexion du cloud. Cette technique permet une augmentation de la portée initiale de communication entre les capteurs et le cloud.



FIGURE 1.1 – Représentation schématique d'un déploiement de la technologie Dryad [5]

Le capteur Silvanet Wildfire Sensor est conçu pour une détection ultra-précoce, identifiant les incendies de forêt en quelques minutes afin de minimiser les dégâts et leur impact. Sensible à l'hydrogène, au monoxyde de carbone et à d'autres gaz, ce « nez électronique » peut détecter les incendies dès la phase de combustion lente, permettant ainsi aux pompiers de les éteindre avant qu'ils ne se propagent. Il surveille également les conditions microclimatiques en mesurant la température, l'humidité et la pression atmosphérique. Le capteur utilise une détection de gaz hautement sensible avec une intelligence artificielle intégrée pour garantir une détection précise des incendies et minimiser les fausses alarmes. Utilisant **LoRaWAN** pour la transmission de données sans fil, le capteur fonctionne sans entretien pendant 10 à 15 ans et utilise des supercondensateurs à la place de piles, éliminant ainsi le besoin de lithium et d'autres matériaux toxiques.

La passerelle Silvanet Mesh Gateway étend le réseau Silvanet pour les déploiements à grande échelle à l'aide d'un réseau maillé **LoRaWAN** multi-sauts bien au-delà de la portée des passerelles à saut unique standard. Dans les environnements forestiers, les Mesh Gateway alimentées par énergie solaire peuvent couvrir un rayon de 2 à 10 km selon la topologie locale et le positionnement. La Mesh Gateway fonctionne uniquement sur la radio **LoRa** pour communiquer avec d'autres Mesh Gateway ou une passerelle frontière, sans nécessiter de connexions **4G/LTE** directes ou câblées.

La Border Gateway qui vient faire le lien entre le réseau Silvanet déployé en forêt et le réseau internet disponible dans le monde urbanisé, peut être alimentée par le secteur (via **PoE**) ou utiliser les cellules solaires incluses. Elle est installée à la lisière d'une zone forestière, généralement dans une maison forestière ou à proximité d'un village. Les options de connectivité comprennent la **4G** intégrée (**LTE-M**, **NB-IoT**), la **2G** (**GPRS**), le satellite intégré (uniquement en Europe et en Amérique du Nord) et l'Ethernet (**PoE**).

1.1.1 Silvanet Wildfire Sensor

Le capteur Silvanet Wildfire mesure 19 cm x 9.2 cm x 1.34 cm et pèse 136 grammes.

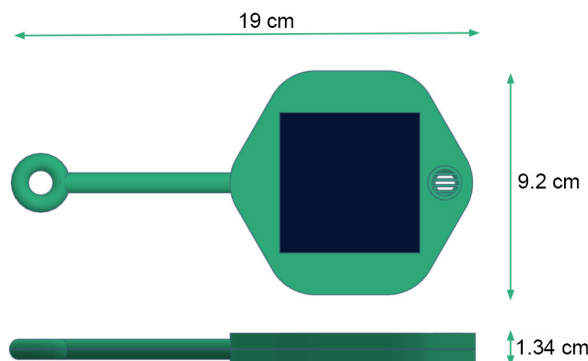


FIGURE 1.2 – Silvanet Wildfire Sensor (gen. 3) avec ses dimensions

Conçu pour une utilisation en milieu forestier, le Silvanet Wildfire Sensor est protégé par un boîtier robuste résistant aux intempéries et aux rayons **UV**, présentant un indice de protection **IP67**. Le capteur est conçu pour fonctionner entre 10 et 15 ans sans nécessiter de remplacement de pile ni d'entretien particulier.

L'élément central du Wildfire Sensor est le capteur de gaz Bosch BME688. Il s'agit d'un capteur d'hydrogène combinant une surveillance de la qualité de l'air à très faible consommation d'énergie avec un mode de détection de gaz précis capable d'identifier la présence d'un feu couvant sur des distances allant jusqu'à 115 mètres. En plus de l'hydrogène (H_2), ce capteur permet également la détection du monoxyde de carbone (CO) à un niveau de l'ordre du ppm.

Le Wildfire Sensor est également muni de capteurs servant à détecter la présence de composés organiques volatils (**Volatile Organic Compounds (VOC)**) et de composés soufrés volatils (S) pour des concentrations inférieures à 20 ppm.

Les composés organiques volatils, communément désignés par l'acronyme **VOC**, sont des substances chimiques carbonées capables de se vaporiser rapidement dans l'atmosphère à température ambiante. Présents dans l'ensemble du monde vivant — et notamment dans les arbres —, ils se diffusent dans l'air et peuvent se dissoudre dans l'eau. La fumée produite lors d'un incendie en constitue un exemple typique de source de **VOC**. Cependant, ces composés ne sont pas propres aux feux de forêt : on les retrouve également dans les émissions des gisements pétroliers et gaziers, ainsi que dans les gaz d'échappement des moteurs diesel. Cette multiplicité de sources rend leur interprétation délicate, et c'est pourquoi les capteurs s'appuient sur des algorithmes d'apprentissage automatique afin de distinguer les **VOC** caractéristiques d'un départ de feu de ceux issus d'autres origines.

Le Wildfire Sensor embarque donc une intelligence artificielle visant à améliorer la fiabilité de détection des incendies et à limiter les risques de détections de faux positifs.

Outre la surveillance des gaz, le capteur assure un suivi du microclimat local grâce à la mesure de trois variables : la pression atmosphérique, l'humidité relative et la température. Les plages de mesure associées sont respectivement comprises entre 300 hPa et 1100 hPa, entre 0 % et 100 % d'humidité relative et entre $-40^{\circ}C$ et $+85^{\circ}C$ [7].

En combinant l'ensemble de ces mesures, le Silvanet Wildfire Sensor surveille le microclimat dans un rayon d'environ 80 à 100 mètres autour de lui. Dans cette même zone d'influence, il est capable de détecter un incendie de dimensions $2\text{ m} \times 3\text{ m}$ jusqu'à 60 minutes avant qu'il ne devienne visible.

L'alimentation du capteur repose sur un panneau solaire intégré de $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$, soit une surface de 36 cm^2 . Dans les conditions difficiles rencontrées en milieu forestier, un panneau de cette taille peut récupérer environ 7 Ws d'énergie par jour. Cette production est suffisante pour

assurer le fonctionnement continu du système pendant 24 heures tout en maintenant une réserve énergétique destinée à l'alimentation du capteur de gaz et à l'émission éventuelle de messages d'alerte de détection d'un feu.

Le panneau solaire produit de l'énergie en continu durant la journée. Même sous une canopée dense, les forêts ne sont jamais totalement plongées dans l'obscurité. L'énergie récoltée permet ainsi de recharger le système pour assurer son fonctionnement après le coucher du soleil. Durant la nuit, le capteur se décharge progressivement jusqu'au lever du jour, moment où environ une heure suffit pour restaurer une charge complète.

Afin d'éviter tout risque d'incendie provoqué par l'appareil lui-même, l'énergie n'est pas stockée dans une batterie mais dans un ensemble de supercondensateurs. Ce choix technologique permet notamment d'éviter l'utilisation de batteries au lithium, connues pour être sujettes à des inflammations, voire à des explosions. Ces phénomènes sont généralement associés à l'emballage thermique (thermal runaway). Il s'agit d'une réaction d'échauffement incontrôlé de la batterie en cours d'utilisation causée par la nature des matériaux utilisés dans la chimie de la batterie [8].

Les supercondensateurs stockent l'énergie nécessaire à l'alimentation du capteur de gaz, de la radio **LoRa** ainsi que des autres composants électroniques. L'énergie emmagasinée correspond à la consommation quotidienne du système et inclut une réserve permettant de maintenir les fonctions critiques en cas de détection d'incendie. Les supercondensateurs utilisés sont conçus pour fonctionner durant dix ans ou davantage. Ce faisant, les capteurs Silvanet Wildfire Sensors n'ont besoin pratiquement d'aucun entretien pendant leurs 10 à 15 ans de durée de vie.

Bien qu'ils disposent d'une capacité énergétique élevée, les supercondensateurs présentent une tension maximale relativement faible, de l'ordre de 2,7 V. Ils sont donc assemblés en série afin d'atteindre une tension maximale de 5,2 V en pleine charge, tandis que la tension de fonctionnement nominale se situe autour de 4 V.

Selon les chiffres communiqués par DRYAD, les capteurs Wildfire présentent une puissance moyenne d'environ 0,7 mW, soit environ 60 à 63 J par jour. Les deux principaux postes de consommation sont le capteur de gaz et le module radio **LoRa**. Le capteur de gaz présente une consommation d'environ 3,9 mA lorsqu'il fonctionne en mode de détection standard. Aucune donnée détaillée n'est en revanche disponible concernant la consommation du module **LoRa**.

Le fonctionnement du capteur repose principalement sur un mode veille. Toutes les 60 secondes, il passe en mode actif pendant environ une seconde pour mesurer la qualité de l'air. Ensuite, toutes les deux heures, une mesure supplémentaire est réalisée avant d'envoyer le tout sous la forme d'un unique paquet de données vers la plateforme cloud Silvanet au travers des Mesh Gateways et des Border Gateways.

Ces paquets de données contiennent les informations environnementales suivantes :

- la pression atmosphérique en hPa ;
- la température en degrés Celsius ou Fahrenheit selon la région ;
- le taux d'humidité relative ;
- la qualité de l'air dans l'environnement immédiat du capteur ;
- le niveau d'énergie stocké dans les supercondensateurs.

Les autres paramètres du module radio **LoRa** connus sont les bandes **ISM** autorisées par région. Comme le protocole **LoRaWAN** fonctionne dans un spectre radioélectrique sans licence, cela signifie que n'importe qui peut utiliser ces fréquences radio sans avoir à payer un droit d'utilisation. Le même principe est appliqué aux réseaux Wi-Fi pour les bandes **ISM** de 2.4 GHz et 5 GHz. **LoRaWAN** utilise des fréquences radio plus basses offrant une plus grande portée mais cela entraîne des restrictions supplémentaires souvent spécifiques à chaque pays. Pour le protocole Silvanet de DRYAD, les plans de fréquences utilisés sont US902-928 pour les États-

Unis, AU915 pour l'Australie, EU868 pour l'Europe et AS923 pour l'Asie [9].

La puissance de transmission du module **LoRa** est fixée à 14 dBm.

En ce qui concerne les paramètres de placement des capteurs dans la forêt, plusieurs grandeurs sont connues : la portée de détection des gaz, la distance maximale de communication avec le Mesh Gateway le plus proche, le nombre maximal de capteurs par passerelle ainsi que les densités de déploiement de capteurs en fonction de l'environnement et de sa proximité avec les lieux investis par les humains.

Le Silvanet Wildfire Sensor peut détecter des gaz présents dans l'air ambiant dans un rayon de 80 à 100 mètres en fonction de la topologie et de la densité de la végétation. Cette variation est due à la potentielle présence de collines, de vallées, d'une densité importante d'arbres ou de structures humaines présentes sur les sites de déploiement. Le capteur peut également détecter la fumée d'un feu situé au-delà de sa portée de détection si cette fumée dérive vers sa zone de détection, transportée par le vent. Dans le cas où la fumée dérive vers plusieurs autres capteurs, il est possible de retrouver la position d'origine du feu en calculant la vitesse de propagation du vent en fonction des concentrations de gaz découvertes à chaque capteur et le moment précis de ces découvertes [10].

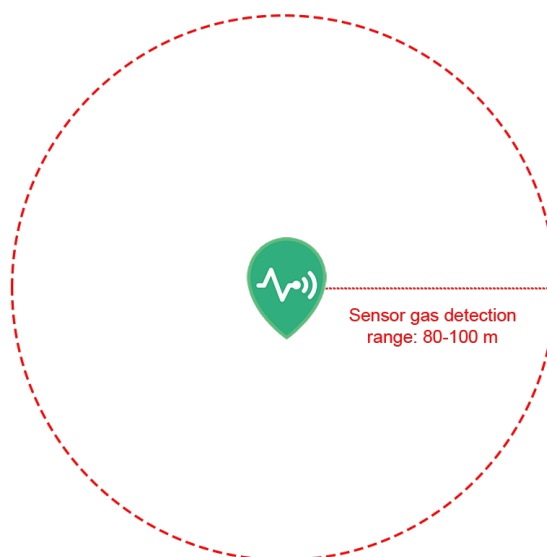


FIGURE 1.3 – Portée de détection de fumée du capteur Silvanet Wildfire

La distance maximale de communication avec une passerelle Mesh Gateway est d'environ un kilomètre. Comme pour la portée de détection de gaz, cette distance varie selon la topologie de la forêt : une forêt dense ou un relief accidenté peuvent réduire significativement cette distance maximale tandis qu'une ligne de vue directe vers le Mesh Gateway peut permettre une portée plus longue.

DRYAD recommande l'installation d'au moins une Mesh Gateway pour chaque centaine de capteurs Wildfire déployés. Cette valeur reste néanmoins dépendante des caractéristiques propres au site et des contraintes de propagation radio.

Pour ce qui est de la densité des capteurs, il est nécessaire de distinguer deux cas en fonction de l'activité humaine aux abords de la zone étudiée. Cette classification se repose sur un concept qui nous vient des États-Unis, le **Wildland Urban Interface (WUI)** [11] qu'on peut traduire par "interface ville-nature". Cette interface désigne les zones de transition où l'espace urbain et les milieux naturels se rencontrent et s'interpénètrent. C'est dans ces espaces — qu'il s'agisse d'une ligne de démarcation franche ou d'une zone de mélange progressive — que les constructions et

infrastructures humaines côtoient directement la végétation sauvage et les combustibles naturels que celle-ci concentre. Les zones présentant une forte activité humaine, les **WUI** où la ville est plus présente que la nature, nécessitent un déploiement dense de capteurs car les dangers y sont plus nombreux. Il s'agit notamment des sites comportant des sentiers de randonnée, des campings, des routes, des voies ferrées, des ponts en bois, des poteaux et des pylônes électriques, des habitations résidentielles et d'autres types de bâtiments. À l'inverse, dans les zones à faible activité humaine, les **WUI** où la nature est dominante, il y aura une densité moindre de capteurs.

Activité humaine	Type de densité	Distance entre les capteurs	Valeur de densité
Élevée	Déploiement dense dans les zones à haut risque	80 à 100 m	0.7 capteur / ha
Faible	Déploiement clairsemé dans les endroits isolés	400 à 500 m	0.1 capteur / ha

TABLE 1.1 – Valeurs de densité de capteurs recommandées

1.1.2 Silvanet Mesh Gateway

La passerelle Silvanet Mesh mesure 82 cm x 34 cm x 6 cm (16 cm avec le support de fixation) et son poids est de 6,8 kg (sans le support de fixation).

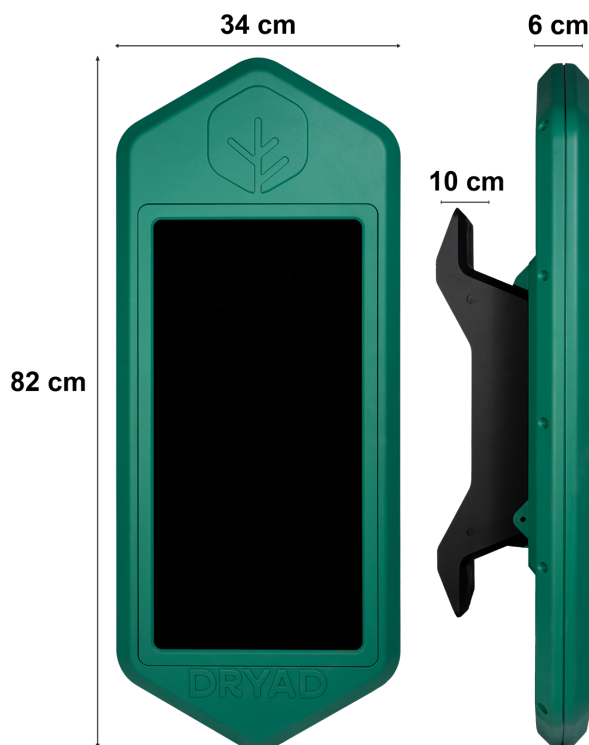


FIGURE 1.4 – Silvanet Mesh Gateway (gen. 3) avec ses dimensions

Les passerelles maillées (Mesh Gateways) constituent l'infrastructure de communication intermédiaire du réseau Silvanet. Leur rôle principal est d'assurer la connectivité entre les capteurs Silvanet Wildfire et les passerelles périphériques (Border Gateways) chargées de transmettre les données vers la plateforme cloud.

Les messages générés par les capteurs Wildfire sont transmis de proche en proche au travers du réseau maillé Silvanet jusqu'à atteindre une passerelle périphérique. Chaque Mesh Gateway reçoit ainsi les messages provenant des capteurs ou d'autres passerelles maillées situées à portée radio, puis les retransmet vers la destination la plus appropriée. Ce mécanisme permet la création de chemins de communication multiples au sein du réseau et améliore sa robustesse face aux perturbations locales.

La passerelle maillée Silvanet a été conçue pour faciliter les déploiements à grande échelle dans des environnements forestiers complexes. Elle permet notamment de surmonter les difficultés de propagation radio causées par le relief, telles que les collines, les vallées, les affleurements rocheux, les falaises ou les zones montagneuses. Grâce à cette architecture maillée, les données peuvent contourner les obstacles naturels en empruntant plusieurs chemins de communication successifs.

La dernière génération de Mesh Gateway bénéficie d'une conception repensée intégrant l'antenne directement dans le boîtier. Celui-ci est résistant aux intempéries ainsi qu'aux rayonnements **UV** et présente un indice de protection **IP67**, garantissant un fonctionnement fiable dans les conditions environnementales difficiles rencontrées en forêt.

Les passerelles peuvent être installées rapidement sur des arbres ou sur des poteaux à l'aide de supports de fixation adaptés. Comme les autres équipements du système Silvanet, elles sont conçues pour fonctionner sans maintenance pendant une période comprise entre 10 et 15 ans.

L'alimentation énergétique repose sur un panneau solaire intégré de 50 cm × 25 cm situé sur la face avant du boîtier. Ce panneau produit de l'énergie en continu durant la journée et recharge suffisamment le système pour assurer son fonctionnement après le coucher du soleil. Pendant la nuit, l'énergie stockée est progressivement consommée jusqu'au lever du jour. Une fois le soleil revenu, la recharge complète du système est réalisée en environ une heure.

L'énergie produite est stockée dans un ensemble de supercondensateurs destinés à alimenter le module radio ainsi que les autres composants électroniques de la passerelle. Cette réserve énergétique est dimensionnée pour couvrir les besoins quotidiens de fonctionnement tout en permettant au système de rester opérationnel durant toute la nuit.

Comme pour les capteurs Wildfire, le choix des supercondensateurs répond à des contraintes de sécurité et de durabilité. Contrairement aux batteries rechargeables conventionnelles, les supercondensateurs ne présentent pas les mêmes risques d'inflammation associés aux phénomènes d'emballement thermique. Leur utilisation permet ainsi d'éviter qu'un équipement destiné à détecter les incendies puisse lui-même constituer une source potentielle d'ignition.

Les supercondensateurs utilisés présentent une durée de vie estimée à dix ans ou davantage, ce qui contribue directement à l'absence quasi totale de maintenance des passerelles maillées. Cette caractéristique permet d'atteindre une durée de vie globale comprise entre 10 et 15 ans.

Bien qu'ils disposent d'une capacité énergétique importante, les supercondensateurs présentent une tension maximale relativement faible de 2,7 V. Ils sont donc assemblés en série afin d'obtenir une tension de fonctionnement d'environ 4 V. En pleine charge, la tension maximale atteint 5,2 V.

La passerelle maillée intègre également une interface de communication **NFC** destinée à faciliter les opérations d'installation et de maintenance. Cette fonctionnalité permet de configurer les équipements dans des zones dépourvues de connectivité mobile et offre également des possibilités de diagnostic local.

Lors de l'installation, l'opérateur utilise l'application Silvanet Deployment sur un smartphone compatible **NFC**. Il lui suffit d'approcher le téléphone du symbole **NFC** présent sur le boîtier afin d'enregistrer et de configurer la passerelle avant sa fixation définitive sur un arbre ou un poteau.

Les communications entre passerelles reposent sur la technologie **LoRaWAN**. Cette technologie permet à chaque Mesh Gateway de communiquer avec les autres passerelles maillées du réseau ainsi qu'avec les Border Gateways situés à portée. La solution est également compatible avec l'ensemble des capteurs **LoRaWAN** pris en charge par Silvanet ainsi qu'avec certains équipements tiers compatibles.

Les bandes de fréquences utilisées correspondent aux bandes **ISM** autorisées dans chaque région du monde, à savoir NA902-928 pour l'Amérique du Nord, AU915 pour l'Australie, EU868 pour l'Europe et AS923 pour l'Asie. La puissance maximale de transmission peut atteindre 27 dBm, dans le respect des réglementations locales. Chaque passerelle dispose de cinq canaux de réception et d'un canal d'émission.



FIGURE 1.5 – Portée de communication entre une passerelle maillée Silvanet Mesh Gateway et une passerelle frontière Silvanet Border Gateway.

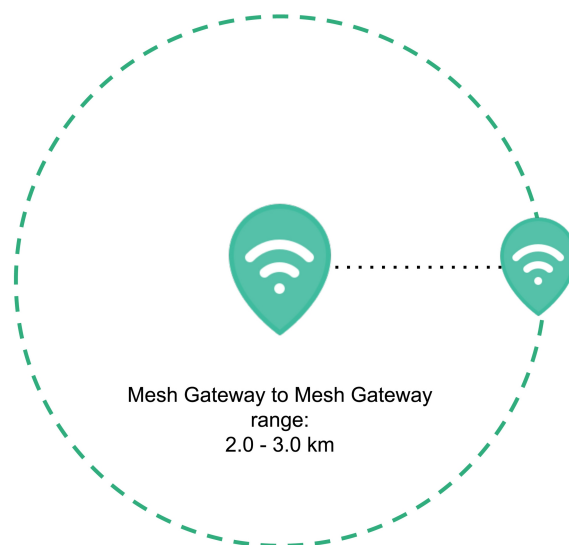


FIGURE 1.6 – Portée de communication entre deux passerelles maillées Silvanet Mesh Gateway.

La portée de communication entre deux Mesh Gateways est généralement comprise entre 2 et 3 kilomètres. Une portée similaire est observée entre une Mesh Gateway et une Border Gateway. Toutefois, ces valeurs dépendent fortement de la topologie locale. Dans des conditions favorables présentant une ligne de visée directe entre les équipements, des portées supérieures à 3 kilomètres peuvent être obtenues et des distances proches de 8 kilomètres ont été observées lors de certains essais.

Afin d'améliorer les performances radio, les passerelles sont généralement installées à une hauteur minimale de trois mètres au-dessus du sol forestier. Une installation à une hauteur plus importante permet d'augmenter la portée de communication et de réduire l'impact des obstacles naturels susceptibles de dégrader la qualité des liaisons radio.

Concernant les recommandations de déploiement, une passerelle périphérique (Border Gateway) peut généralement prendre en charge jusqu'à vingt passerelles maillées (Mesh Gateway), selon la topologie du site. Cette valeur ne constitue toutefois pas une limite stricte puisque les Mesh Gateways jouent également le rôle de répéteurs radio. Il est donc possible d'étendre progressivement le réseau en ajoutant des passerelles supplémentaires lorsque cela est nécessaire.

Afin de garantir la robustesse du réseau maillé, il est recommandé que chaque passerelle maillée puisse communiquer avec au moins deux autres passerelles du réseau. Cette redondance permet de maintenir la connectivité même en cas de défaillance d'un équipement ou de dégradation

temporaire d'une liaison radio.

1.1.3 Silvanet Border Gateway

La passerelle Silvanet Border Gateway mesure 51 cm × 34 cm × 10 cm (18 cm avec le support de fixation) et son poids est de 4 kg (support de fixation inclus).

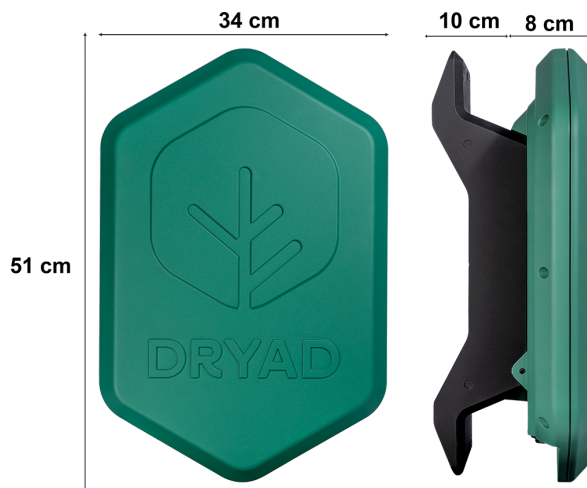


FIGURE 1.7 – Silvanet Border Gateway (gen. 3) avec ses dimensions

La passerelle frontalière Silvanet (Border Gateway) constitue l'élément assurant l'interface entre le réseau maillé Silvanet déployé dans la forêt et la plateforme cloud Silvanet. Son rôle principal consiste à collecter les messages provenant des Mesh Gateways et à les transmettre vers Internet afin de permettre leur traitement et leur visualisation à distance.

Contrairement aux passerelles maillées qui assurent uniquement le relais des communications à l'intérieur du réseau forestier, la Border Gateway constitue le point de sortie du réseau Silvanet vers les infrastructures de communication externes. Elle est conçue pour fonctionner en continu, vingt-quatre heures sur vingt-quatre, afin de garantir la réception permanente des données transmises par les capteurs Wildfire déployés sur le site.

La troisième génération de passerelles de périphérie développée par DRYAD intègre désormais l'ensemble de ses antennes directement dans le boîtier. Les antennes **LoRaWAN**, **LTE-M**/**NB-IoT** ainsi que l'antenne satellite du modèle **SBG-3S** sont ainsi protégées contre les dégradations accidentelles et les risques de vol. Cette intégration contribue également à simplifier l'installation de l'équipement sur le terrain.

Le boîtier présente une conception robuste spécialement adaptée aux environnements forestiers. Résistant aux intempéries et aux rayonnements ultraviolets, il offre un indice de protection **IP66** pour la passerelle ainsi que pour les panneaux solaires associés. Les différents connecteurs sont intégrés directement dans le boîtier et protégés par des capuchons étanches. Ils permettent notamment le raccordement des panneaux solaires, d'un injecteur **PoE** ou encore d'une carte **SIM**/**M2M** optionnelle.

L'installation de l'équipement peut être réalisée rapidement sur un arbre ou sur un poteau à l'aide des supports de fixation fournis. Comme les autres composants du système Silvanet, la passerelle est conçue pour fonctionner sans maintenance pendant une durée comprise entre 10 et 15 ans.

L'alimentation énergétique repose principalement sur deux panneaux solaires indépendants

de 40 W chacun, fournissant une puissance totale de 80 W. Les panneaux mesurent chacun 67 cm × 35 cm × 8 cm, ou 18 cm de profondeur lorsqu'ils sont installés sur leur support de fixation.

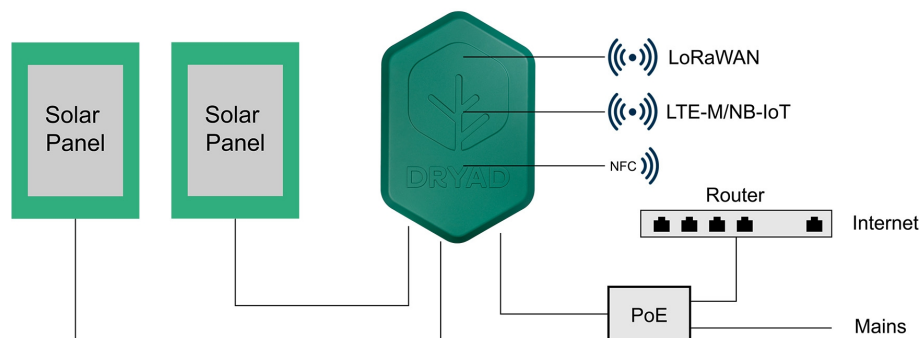


FIGURE 1.8 – Schéma des connexions de puissance et d'internet pour la passerelle Silvanet Border

L'utilisation de deux panneaux distincts présente un avantage important lors du déploiement : les panneaux peuvent être orientés de manière optimale vers le soleil afin de maximiser la production énergétique, tandis que la passerelle elle-même peut être positionnée indépendamment afin de maintenir une ligne de visée favorable vers les Mesh Gateways les plus proches.

Dans la majorité des scénarios de déploiement, la puissance fournie par les deux panneaux solaires est suffisante pour assurer le fonctionnement permanent de la passerelle, même dans des environnements où l'ensoleillement est limité pendant certaines périodes de l'année. Cette capacité permet à la Border Gateway de rester continuellement opérationnelle afin de recevoir et transmettre les données du réseau.

L'énergie produite est stockée dans un ensemble de supercondensateurs qui alimentent les différents modules électroniques de la passerelle. Comme pour les autres équipements de la gamme Silvanet, les supercondensateurs ont été préférés aux batteries rechargeables conventionnelles afin d'éliminer les risques d'inflammation associés aux phénomènes d'emballement thermique. Ce choix est particulièrement pertinent dans le cadre d'un système dont la mission première consiste précisément à détecter les départs d'incendie.

Les supercondensateurs utilisés présentent une durée de vie estimée à dix ans ou davantage, ce qui contribue directement à l'objectif de fonctionnement sans entretien pendant toute la durée de vie du système.

Selon les conditions du site, l'alimentation peut également être complétée par une connexion au réseau électrique. Dans ce cas, les panneaux solaires jouent le rôle de source d'énergie de secours et garantissent la continuité du fonctionnement lors d'éventuelles coupures de courant. L'alimentation filaire est assurée au moyen d'un injecteur **PoE** conforme à la norme **IEEE 802.3af** et fournissant une tension comprise entre 36 V et 57 V.

La Border Gateway offre plusieurs possibilités de connexion vers Internet afin de s'adapter aux contraintes du site de déploiement.

Dans sa configuration standard, elle peut utiliser son modem cellulaire intégré compatible **LTE-M** et **NB-IoT**. Cette solution permet un fonctionnement entièrement sans fil lorsque le site dispose d'une couverture réseau suffisante.

Lorsque cela est possible, la passerelle peut également être raccordée à un réseau filaire au moyen d'une connexion Ethernet. Les modèles **SBG-3** et **SBG-3S** autorisent par ailleurs une utilisation simultanée des connexions Ethernet et cellulaires afin d'améliorer la disponibilité du système.

Pour les sites les plus isolés, dépourvus de couverture mobile, le modèle **SBG-3S** dispose d'une connectivité satellite intégrée. Cette fonctionnalité permet le déploiement du système dans des régions particulièrement reculées tout en garantissant la transmission des données vers la plateforme cloud. À l'heure actuelle, cette option est disponible pour les déploiements réalisés en Europe et en Amérique du Nord.

Les communications avec les Mesh Gateways reposent sur la technologie **LoRaWAN**. La Border Gateway assure ainsi la collecte des informations provenant de l'ensemble du réseau maillé déployé sur le terrain. Comme pour les Mesh Gateways, les bandes de fréquences utilisées correspondent aux bandes **ISM** autorisées dans les différentes régions du monde : NA902-928, AU915, EU868 et AS923.

La puissance maximale d'émission peut atteindre 27 dBm dans le respect des réglementations locales. Le système dispose de cinq canaux de réception et d'un canal d'émission. Le gain de l'antenne **LoRa** intégrée est de 0,75 dBi.

La portée recommandée entre une Border Gateway et les Mesh Gateways associées est comprise entre 2 et 3 kilomètres. Cette distance dépend néanmoins fortement de la topologie locale, de la végétation et des éventuels obstacles présents sur le site.

Chaque Border Gateway peut prendre en charge jusqu'à vingt Mesh Gateways. Cette valeur permet de couvrir de vastes surfaces forestières tout en conservant une architecture réseau hiérarchisée et facilement extensible.

À l'instar des Mesh Gateways, la Border Gateway intègre une interface **NFC** destinée à faciliter les opérations de déploiement. Cette fonctionnalité permet aux installateurs de configurer l'équipement même dans des zones dépourvues de couverture mobile et offre également des capacités de diagnostic local.

L'enregistrement de la passerelle est réalisé à l'aide de l'application Silvanet Deployment installée sur un smartphone compatible **NFC**. L'opérateur approche simplement le téléphone du symbole **NFC** présent sur le boîtier afin de configurer l'équipement avant son installation définitive sur un arbre ou un poteau.

1.2 Explication du réseau Mesh distribué

L'un des principaux défis des systèmes de détection précoce des incendies de forêt réside dans la mise en place d'une infrastructure de communication capable de couvrir de vastes zones naturelles tout en conservant une très faible consommation énergétique. Les solutions **IoT** classiques se heurtent généralement à un compromis difficile : soit elles offrent une portée étendue au prix d'équipements coûteux, soit elles reposent sur des réseaux maillés où chaque nœud doit relayer les données de ses voisins, ce qui alourdit significativement leur bilan énergétique. Afin de répondre à cette problématique, DRYAD a développé une architecture originale baptisée Silvanet Mesh Network, protégée par plusieurs brevets et spécifiquement conçue pour les applications de surveillance environnementale à grande échelle.

1.2.1 Point de départ : Réseau **LoRaWAN**

Le réseau **LoRaWAN** est un réseau étendu à longue portée qui fait partie de la famille des réseaux à faible consommation d'énergie **LPWAN**. Le **LoRaWAN** répond aux exigences clés de l'Internet des objets (**IoT**), notamment en matière de communication bidirectionnelle sécurisée, de localisation et de mobilité. La spécification **LoRaWAN** est un protocole en couches (**Media Access Control (MAC)**). Alors que **LoRaWAN** définit le protocole de communication et les droits d'accès au réseau, la couche **LoRa** permet une liaison de communication sans fil à longue portée.

LoRa implique une communication sans fil à très faible consommation d'énergie, **LoRaWAN** désigne un protocole réseau utilisant des puces **LoRa** pour la communication.

Construite selon une topologie en étoile, l'architecture d'un réseau **LoRaWAN** est constituée de passerelles (gateway) agissant comme des ponts relayant les messages entre les terminaux et un serveur réseau central. La connexion entre passerelles et serveur réseau se fait via une connexion **IP** standard alors que les terminaux utilisent une communication sans fil à saut unique **LoRa** pour échanger avec les passerelles. La communication est généralement bidirectionnelle et s'étend sur différents débits de données et canaux de fréquence. Le choix du débit de données représente ici un compromis entre la durée du message et la portée de la communication. Grâce à la technologie dite à spectre étalé, les communications à différents débits de données n'interfèrent pas entre elles. Les débits de données **LoRaWAN** vont de 0,3 kbps à 50 kbps. La puissance d'émission **RF** et le débit de données des terminaux sont gérés individuellement par le serveur du réseau **LoRaWAN** à l'aide d'un schéma de débit adaptatif. Cela a pour but d'optimiser l'autonomie de la batterie des terminaux. La station de base est capable de surveiller huit fréquences avec de multiples facteurs d'étalement, soit près de quarante-deux canaux. [12]

LoRa se distingue par une consommation énergétique particulièrement réduite, rendue possible par sa technique de modulation : l'étalement de spectre par chirp, dont le principe est protégé par le brevet américain US 7791415 B2 [13]. Cette technologie est développée et licenciée par la société *Semtech*. Elle exploite des bandes de fréquences libres de droits situées sous le gigahertz — notamment 433 MHz et 868 MHz en Europe, ou encore 915 MHz en Australie et en Amérique du Nord — ce qui lui confère une portée pouvant dépasser les 10 kilomètres en milieu rural, tout en maintenant une empreinte énergétique minimale.

Sur le plan de la couche physique, **LoRaWAN** repose sur une modulation à spectre étalé, avec la particularité d'employer des signaux de type chirp — c'est-à-dire des signaux dont la fréquence évolue continûment dans le temps. Cette approche offre un équilibre judicieux entre sensibilité de réception et débit de données maximal. D'un point de vue pratique, la technologie est relativement économique à déployer, car elle ne nécessite pas de source d'horloge de haute précision. Sa consommation en mode veille est extrêmement faible, comprise entre 10 et 100 nA, ce qui permet d'envisager des autonomies de batterie allant jusqu'à quinze ans.

Dans la terminologie **LoRaWAN**, il faut distinguer trois variantes de terminaux :

- La classe A est la plus simple et la plus économe en énergie des trois classes **LoRaWAN**. Elle repose sur le protocole d'accès ALOHA, un mécanisme de communication dit « non coordonné » : chaque terminal transmet ses données quand il en a besoin, sans se synchroniser avec les autres nœuds du réseau ni attendre une autorisation préalable. Si deux terminaux émettent simultanément, leurs signaux entrent en collision et les paquets sont perdus — mais en pratique, la faible fréquence d'envoi des capteurs IoT rend ce risque acceptable. Concrètement, le fonctionnement d'un terminal de classe A se déroule en trois temps : le terminal envoie d'abord ses données vers la passerelle, puis ouvre deux courtes fenêtres de réception successives pendant lesquelles il peut recevoir d'éventuelles données descendantes. En dehors de ces fenêtres, le terminal est en mode veille profonde. Il est important de noter que c'est toujours le terminal qui prend l'initiative de la communication : la passerelle ne peut lui envoyer des données qu'à la suite d'un envoi préalable du terminal, jamais de manière spontanée.

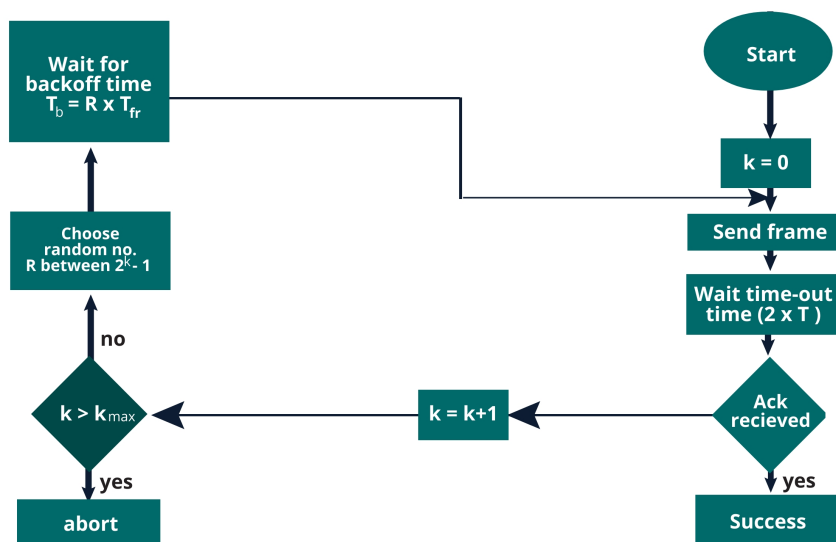


FIGURE 1.9 – Protocole ALOHA [14]

- La classe B constitue un intermédiaire entre réactivité et économie d'énergie. Contrairement à la classe A, où la passerelle ne peut répondre qu'à la suite d'un envoi du terminal, la classe B introduit des fenêtres de réception planifiées à des instants prédéfinis. Pour y parvenir, la passerelle diffuse régulièrement un signal de balise (beacon) qui sert de référence temporelle commune à tous les terminaux. Chaque terminal se synchronise sur cette balise et ouvre ses fenêtres de réception aux moments convenus, ce qui permet au serveur réseau de savoir précisément quand il peut lui envoyer des données, sans dépendre d'un envoi préalable.
- La classe C pousse cette logique à son extrême en maintenant la fenêtre de réception ouverte en permanence. Le terminal est ainsi joignable à tout moment, sans délai d'attente, ce qui offre une latence quasi nulle pour les communications descendantes. Cette disponibilité constante a cependant un coût : la consommation énergétique est nettement plus élevée que pour les classes A et B, ce qui rend cette classe inadaptée aux dispositifs fonctionnant sur batterie. Elle est davantage destinée aux équipements disposant d'une alimentation secteur continue.

L'architecture en étoile du réseau **LoRaWAN** permet aux terminaux (en particulier ceux de classes A et B) de se mettre en mode veille à faible consommation d'énergie pendant de longues périodes, garantissant ainsi que la batterie des terminaux est sollicitée le moins possible et qu'ils peuvent fonctionner pendant plusieurs années sans changement de batterie.

1.2.2 Le réseau maillé

La portée de communication est limitée par la connexion unique entre un terminal et le serveur réseau mais elle peut être étendue en mettant les terminaux en maillage. Dans les réseaux de communication dits "en maillage à sauts multiples", les terminaux communiquent entre eux et se transmettent les données jusqu'à ce qu'un terminal puisse enfin transmettre toutes les données à une passerelle connectée au serveur réseau.

Cependant, un tel réseau n'est pas compatible avec les spécifications d'un réseau **LoRaWAN** car il nécessiterait la mise en place de terminaux spéciaux dotés d'une fonction maillée supplémentaire. Étant donné que les terminaux **LoRaWAN** standard ne peuvent contacter directement qu'une passerelle et ne sont pas capables de communiquer directement avec d'autres terminaux, les terminaux **LoRaWAN** standard ne peuvent pas fonctionner avec cette extension de portée.

Dans les technologies Wi-Fi, il existe une approche permettant de mettre en œuvre une architecture de réseau maillé. Il s'agit de la norme 802.11s. Contrairement aux réseaux Wi-Fi traditionnels basés sur un accès concurrentiel au médium radio, cette norme particulière introduit des mécanismes de coordination permettant d'organiser les transmissions dans le temps et de réduire les collisions dans un environnement partagé. Le routage des données n'est pas réalisé au niveau **IP** classique, mais directement au niveau de la couche **MAC**. Cette approche permet de mieux tenir compte des caractéristiques spécifiques et changeantes de la liaison de communication.

Dans ce type d'architecture, chaque nœud peut jouer plusieurs rôles. Certains nœuds assurent uniquement le relais des données (mesh points), d'autres servent également de points d'accès pour des terminaux utilisateurs (mesh access points), tandis que certains nœuds jouent le rôle de passerelle vers des réseaux externes tels qu'un réseau local (**LAN**) ou étendu (**WAN**) (mesh point portals). Pour les terminaux, le réseau maillé apparaît comme un simple réseau **WLAN**.

La norme 802.11s étant définie pour les architectures de réseau **WLAN**, il n'est pas possible de l'appliquer directement aux réseaux **LoRaWAN**. Mais on peut cependant s'inspirer de l'idée pour appliquer le schéma au type réseau ciblé : l'innovation fondamentale de DRYAD consiste à déplacer la fonctionnalité de maillage depuis les capteurs vers les passerelles. C'est l'objectif posé par le brevet [12]. L'objectif de l'invention est donc de fournir une solution pour la limitation de portée entre le serveur réseau et le terminal, grâce à laquelle les terminaux existants compatibles **LoRaWAN** bénéficient également d'une extension de portée sans qu'il soit nécessaire d'implémenter des fonctions supplémentaires dans les terminaux.

Si les réseaux **LoRaWAN** sont étendus à l'aide de passerelles maillées, il est possible d'obtenir une plus grande portée ou une meilleure couverture de zone dans les zones sans accès à Internet via un réseau **LoRaWAN**. Cela ne nécessite que des passerelles individuelles connectées au serveur réseau via un protocole **IP**. Étant donné que le protocole de communication entre les passerelles et les terminaux peut rester inchangé, cette approche préserve la compatibilité avec les terminaux **LoRaWAN** existants et ne nécessite aucune adaptation des terminaux à la fonctionnalité maillée.

Selon l'invention proposée par le brevet [12], les passerelles comprennent maintenant une unité de génération d'**ACK** (de l'anglais "acknowledgement" pour accusé de réception). L'unité de génération d'**ACK** est composée d'un processeur et d'une mémoire, composants standard et peu coûteux. Elle est utilisée pour générer un signal **ACK**, lui-même utilisé pour confirmer la réception d'un paquet de données lors d'une transmission. Le signal **ACK** garantit qu'un message provenant du terminal et destiné à une passerelle est correctement envoyé à la passerelle. Le terminal n'a pas besoin de disposer d'une fenêtre de réception de téléchargement active en permanence.

L'architecture développée par DRYAD repose sur deux types de passerelles distincts : les Front-End Gateways (**FGD**) et les Border Gateways (**BGD**). Ces types de passerelles se distinguent par leurs ports de communication destinés à la communication avec d'autres passerelles, un serveur réseau ou des terminaux, ainsi que par le type de communication qui en résulte.

La passerelle frontale (**FGD**) est une passerelle comme décrite dans le pénultième paragraphe, selon l'invention de DRYAD. Une **FGD** possède un premier port de communication pour la communication avec un terminal et d'un deuxième port de communication pour la communication avec une autre passerelle frontale et/ou une passerelle de bordure. Les terminaux sont donc directement connectés à une passerelle frontale au moyen d'un réseau de communication à saut unique via le premier port de communication alors que les passerelles frontales et les passerelles de bordure sont reliées entre elles au moyen du second port de communication via un réseau maillé à sauts multiples.

La passerelle de bordure (**BGD**) dispose d'un premier port de communication pour communiquer avec un serveur réseau et d'un deuxième port de communication pour communiquer avec

une passerelle frontale.

DRYAD met également en avant un troisième type de passerelles, le Mesh Gateways (MGD). Ces passerelles maillées sont constituées d'une combinaison de passerelles frontales FGD et de passerelles de périphérie BGD. Les passerelles maillées MGD communiquent entre elles via un réseau de communication à sauts multiples, et au moins une passerelle maillée MGD est connectée au serveur réseau NS via le protocole Internet standard IP.

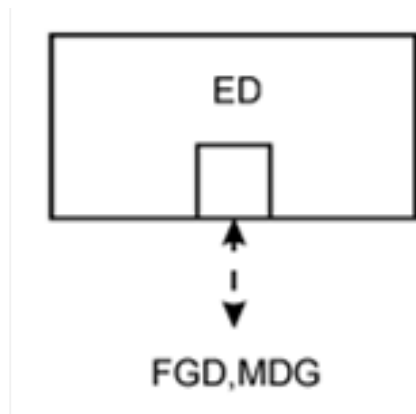


FIGURE 1.10 – Schéma des connexions d'un terminal (ED)

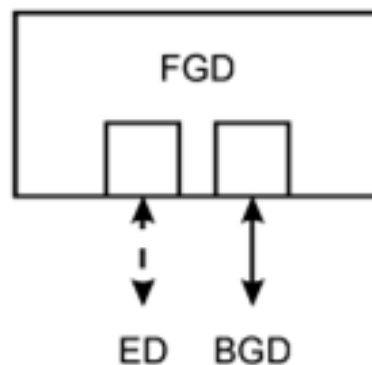


FIGURE 1.11 – Schéma des connexions d'une passerelle frontale (FGD)

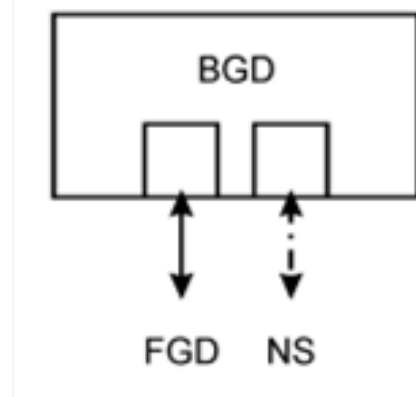


FIGURE 1.12 – Schéma des connexions d'une passerelle de bordure (BGD)

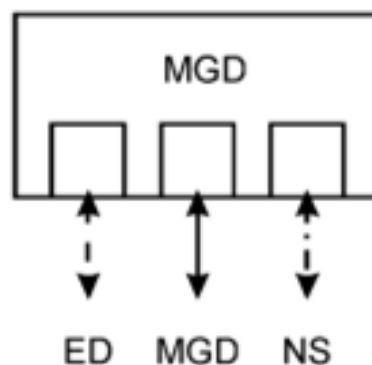


FIGURE 1.13 – Schéma des connexions d'une passerelle maillée (MGD)

Les passerelles sont interconnectées via un réseau maillé à sauts multiples, de sorte qu'une passerelle n'a pas nécessairement besoin d'une connexion directe pour communiquer avec les terminaux. Cela étend la portée du réseau LoRaWAN, car les passerelles sont connectées les unes aux autres via le réseau maillé à sauts multiples et peuvent ainsi transférer les données des terminaux vers le serveur du réseau Internet. Ainsi, la limitation de portée imposée par la norme LoRaWAN, qui impose une connexion directe entre le terminal et la passerelle, est supprimée.

La communication au sein d'un réseau de passerelles maillées LoRaWAN peut être décomposée en cinq étapes successives :

1. Génération du message : un terminal génère un message sous la forme d'un paquet de données. Cette opération est réalisée par le processeur embarqué dans le terminal, qui rassemble et prépare les informations à transmettre.
2. Transmission vers une passerelle : le paquet de données est ensuite envoyé du terminal vers une passerelle. Cette transmission est généralement réalisée par liaison radio, bien qu'une connexion filaire soit également envisageable dans certaines configurations.

3. Réception du message : la passerelle reçoit le paquet de données transmis par le terminal et procède à son traitement.
4. Génération de l'accusé de réception : après avoir reçu correctement le message, la passerelle génère un signal **ACK**. Ce signal constitue un accusé de réception permettant de confirmer que le paquet de données a bien été reçu.
5. Transmission de l'**ACK** vers le terminal : le signal **ACK** est finalement envoyé par la passerelle au terminal afin de l'informer que la transmission a été effectuée avec succès.

L'approche proposée par l'invention permet de garantir qu'un message émis par un terminal **LoRaWAN** soit correctement acheminé vers une passerelle du réseau. Contrairement à certaines solutions d'extension de portée nécessitant des terminaux capables de relayer eux-mêmes les messages, cette méthode conserve une compatibilité complète avec la spécification **LoRaWAN** existante. Les terminaux n'ont donc pas besoin de maintenir une fenêtre de réception active en permanence, comme c'est le cas pour les dispositifs de classe C. Des terminaux standards de classe A ou de classe B peuvent ainsi être utilisés sans modification.

Une fois reçu par une première passerelle, le message peut être retransmis vers une autre passerelle du réseau ou directement vers le serveur réseau **LoRaWAN**. Cette architecture permet d'étendre considérablement la portée du système en créant un réseau multi-sauts composé de passerelles interconnectées. L'extension de couverture est ainsi réalisée au niveau de l'infrastructure réseau plutôt qu'au niveau des terminaux, ce qui préserve la compatibilité avec les équipements **LoRaWAN** conventionnels.

Au sein de cette architecture, au moins une passerelle est connectée au serveur réseau via une liaison **IP** classique et utilise les mécanismes de communication prévus par le protocole **LoRaWAN**. Les autres passerelles peuvent alors transmettre leurs données à travers le réseau maillé jusqu'à atteindre cette passerelle connectée à Internet.

La figure 1.14 représente les passerelles frontales **FGD** communiquant entre elles via un réseau de communication à sauts multiples et au moins l'une des passerelles frontales **FGD** communiquant avec une passerelle de bord **BGD**, qui échange ensuite des données directement avec le serveur de réseau **NS** à l'aide du protocole Internet **IP**.

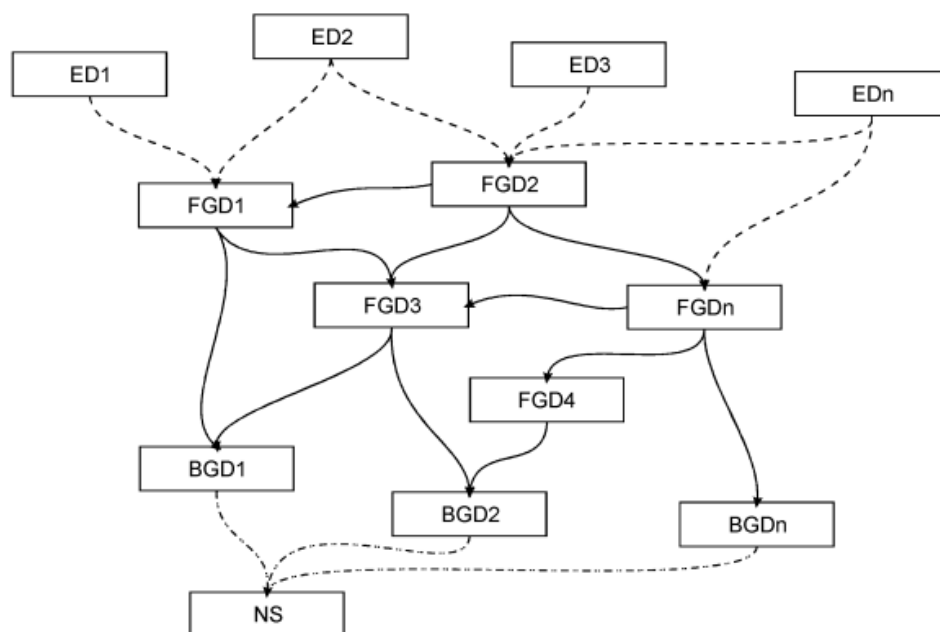


FIGURE 1.14 – Schéma d'un réseau mesh comme défendu par le brevet [12]

Chapitre 2

Tour d'horizon de technologies de communication sans fil natives sur smartphone et du protocole LoRa, utilisé par la solution Silvanet de DRYAD

2.1 LoRa

La technologie LoRa est une technologie de communication radio conçue pour transmettre de petites quantités de données sur de longues distances avec une consommation énergétique réduite. Elle appartient à la famille des technologies LPWAN, c'est-à-dire des technologies destinées à connecter des objets à faible consommation sur de larges zones géographiques. LoRa est particulièrement adaptée aux applications de l'Internet des objets dans lesquelles les nœuds communiquent de manière ponctuelle et transmettent de faibles volumes de données, comme la télémétrie, la surveillance environnementale ou l'agriculture connectée.

Dans une perspective IoT, l'intérêt de LoRa réside donc moins dans sa capacité à transmettre rapidement de grandes quantités de données que dans sa capacité à maintenir une liaison radio robuste avec une consommation énergétique limitée. Cette caractéristique explique son utilisation dans des scénarios où les objets sont dispersés sur de grandes surfaces et où l'accès à une infrastructure réseau classique est difficile. Cilfone et al. [15] classent d'ailleurs LoRa parmi les technologies sub-GHz adaptées aux communications de grande portée et à faible bande passante, par opposition aux technologies comme le Wi-Fi, qui offrent un débit plus élevé mais sur des distances plus réduites.

Il est important de distinguer LoRa et LoRaWAN. LoRa désigne la couche physique, c'est-à-dire la technique de modulation radio utilisée pour transmettre l'information. LoRaWAN, en revanche, définit le protocole réseau construit au-dessus de LoRa. Il précise l'architecture du réseau, les classes d'appareils, les mécanismes d'accès au canal, la sécurité, l'activation des objets et l'acheminement des messages vers les serveurs applicatifs. Cette distinction est essentielle : deux dispositifs peuvent utiliser une modulation LoRa sans nécessairement utiliser LoRaWAN.

Cette séparation entre couche physique et protocole réseau est importante dans le cadre de ce travail. En effet, LoRa fournit uniquement le mécanisme de transmission radio, tandis que LoRaWAN impose une architecture réseau précise. Cela signifie qu'il est possible d'utiliser la modulation LoRa dans des architectures différentes de LoRaWAN, par exemple dans des

protocoles propriétaires ou expérimentaux intégrant des mécanismes de relais et de routage multi-sauts. Cette possibilité est au cœur de plusieurs travaux récents portant sur les réseaux **LoRa** maillés [15], [16].

La modulation **LoRa** repose sur une modulation à étalement de spectre par chirp, appelée **Chirp Spread Spectrum (CSS)**. Un chirp est un signal dont la fréquence varie progressivement au cours du temps sur une bande passante donnée. Dans le cas de **LoRa**, l'information est encodée dans des chirps dont la fréquence balaye la bande du canal. Cette technique permet d'étaler l'énergie du signal sur une bande plus large que celle qui serait strictement nécessaire à la transmission des données. Le récepteur peut ensuite corrélérer le signal reçu avec un chirp de référence afin de récupérer l'information, même lorsque le signal est proche du niveau de bruit.

L'intérêt principal de cette modulation est d'obtenir un gain de traitement important. En augmentant la durée d'un symbole, le récepteur dispose de plus de temps pour détecter le signal. Cela améliore la sensibilité du récepteur et donc la portée de la liaison. En contrepartie, le débit diminue et le temps d'occupation du canal augmente. **LoRa** repose donc sur un compromis fondamental entre portée, débit, robustesse et consommation énergétique.

Trois paramètres radio jouent un rôle central dans le fonctionnement de **LoRa** : le facteur d'étalement, la bande passante et le taux de codage.

Le facteur d'étalement, ou **Spreading Factor (SF)**, détermine le nombre de chirps élémentaires utilisés pour transmettre un symbole. En pratique, les valeurs les plus courantes dans **LoRaWAN** vont de $SF = 7$ à $SF = 12$. Un symbole **LoRa** peut représenter SF bits d'information, et le nombre d'états possibles vaut :

$$M = 2^{SF} \quad (2.1)$$

Plus le facteur d'étalement est élevé, plus le symbole est long. La durée d'un symbole peut être approximée par :

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.2)$$

où T_s est la durée symbole et BW la bande passante du canal [17]. Pour une bande passante de 125 kHz, une transmission en $SF = 7$ donne :

$$T_s = \frac{2^7}{125\,000} \approx 1.024 \text{ ms} \quad (2.3)$$

tandis qu'une transmission en $SF = 12$ donne :

$$T_s = \frac{2^{12}}{125\,000} \approx 32.768 \text{ ms} \quad (2.4)$$

Le passage de $SF = 7$ à $SF = 12$ augmente donc fortement la durée des symboles. Cela améliore la portée et la robustesse de la communication, mais augmente également le temps de transmission et donc la consommation énergétique.

La bande passante BW correspond à la largeur fréquentielle utilisée par le signal **LoRa**. Les bandes passantes les plus courantes sont 125 kHz, 250 kHz et 500 kHz. Pour un même facteur d'étalement, une bande passante plus grande augmente le débit mais diminue la sensibilité du récepteur, car la puissance de bruit augmente avec la bande passante. À l'inverse, une bande passante plus faible améliore la sensibilité mais réduit le débit.

Le taux de codage, ou *Coding Rate*, correspond au mécanisme de correction d'erreurs utilisé par **LoRa**. Il est généralement noté sous la forme 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. Un taux de codage

plus robuste ajoute davantage de redondance dans le message, ce qui permet de corriger plus facilement certaines erreurs de transmission. En contrepartie, le temps de transmission augmente, puisque davantage de bits doivent être envoyés pour transporter la même quantité d'informations utiles.

Le débit binaire utile peut être approximé par :

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \quad (2.5)$$

où CR correspond aux taux de codage 4/5 à 4/8 [17, 18]. Cette équation montre directement que le débit diminue lorsque le facteur d'étalement augmente. Elle montre également que l'augmentation de la bande passante augmente le débit, tandis qu'un codage plus robuste le diminue.

La sensibilité du récepteur peut être reliée à la puissance de bruit et au rapport signal à bruit minimal nécessaire au décodage. En décibels, on peut écrire :

$$P_{sens} = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR_{min} \quad (2.6)$$

où BW est exprimée en hertz, NF est le facteur de bruit du récepteur (le *Noise Figure*), et SNR_{min} est le rapport signal à bruit minimal requis pour décoder correctement le signal. La modulation *LoRa* permet de fonctionner avec des rapports signal à bruit très faibles, parfois négatifs, en particulier pour les facteurs d'étalement élevés. C'est cette propriété qui explique la grande portée des communications *LoRa*.

Pour une bande passante de 125 kHz, les sensibilités typiques associées aux différents facteurs d'étalement sont de l'ordre de -123 dBm pour $SF = 7$ et peuvent descendre jusqu'à environ -137 dBm pour $SF = 12$ [19]. Ces valeurs dépendent du matériel utilisé, mais elles illustrent le gain de sensibilité obtenu lorsque le facteur d'étalement augmente. En conséquence, un nœud éloigné d'une passerelle utilisera généralement un facteur d'étalement élevé, tandis qu'un nœud proche pourra transmettre avec un facteur d'étalement plus faible afin de réduire son temps d'émission.

Cette amélioration de portée a cependant un coût. Le temps d'occupation du canal, ou *Time-on-Air*, augmente fortement avec le facteur d'étalement. Le temps total de transmission d'un paquet peut être décomposé en deux parties :

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (2.7)$$

La durée du préambule vaut :

$$T_{preamble} = (N_{preamble} + 4.25)T_s \quad (2.8)$$

où $N_{preamble}$ est le nombre de symboles du préambule. La durée de la charge utile dépend quant à elle de la taille du payload, du facteur d'étalement, du taux de codage, de la présence d'un en-tête explicite ou implicite et de l'utilisation d'un *CRC*. Cette dépendance est importante, car la consommation énergétique d'un objet *LoRa* est directement liée au temps pendant lequel son émetteur radio reste actif.

LoRa est généralement utilisé dans des bandes *ISM* non licenciées. En Europe, les réseaux *LoRaWAN* utilisent principalement la bande EU863-870, autour de 868 MHz. D'autres régions utilisent d'autres bandes de fréquences, par exemple autour de 915 MHz en Amérique du Nord. L'utilisation de bandes non licenciées permet de réduire le coût de déploiement, puisqu'aucune licence opérateur n'est nécessaire. En contrepartie, les communications doivent respecter des

contraintes réglementaires, notamment sur la puissance d'émission et le temps d'occupation du canal.

Du point de vue du bilan de liaison, **LoRa** présente donc un intérêt important. La combinaison d'une puissance d'émission modérée, d'une sensibilité élevée et d'une modulation robuste permet d'obtenir un budget de liaison élevé. C'est ce qui rend possible des communications sur plusieurs kilomètres en environnement rural ou dégagé. En environnement forestier, la portée réelle dépend toutefois fortement de la densité de végétation, de l'humidité, du relief, de la hauteur des antennes et de la présence d'obstacles. Le comportement réel du canal doit donc être évalué avec prudence, car une portée annoncée dans des conditions idéales ne peut pas être transposée directement à un déploiement en forêt.

La principale limite de **LoRa** est son faible débit. Cette technologie n'est pas adaptée à la transmission de données volumineuses, d'images ou de flux continus. Elle est en revanche bien adaptée à des messages courts, peu fréquents, et tolérant une certaine latence. Dans le cadre d'un système de détection d'incendie de forêt, cette caractéristique est cohérente avec les besoins du réseau de capteurs : un capteur environnemental transmet généralement des mesures simples ou une alerte, et non un flux de données important.

2.1.1 LoRaWAN

LoRaWAN est le protocole réseau défini au-dessus de la modulation **LoRa**. Il est spécifié par la **LoRa** Alliance et vise à fournir une architecture complète pour connecter des objets à faible consommation à des serveurs applicatifs via des passerelles. **LoRaWAN** définit notamment la topologie du réseau, la couche **MAC**, les classes d'appareils, les méthodes d'activation, la sécurité, les paramètres régionaux et certains mécanismes d'optimisation comme l'**Adaptive Data Rate**.

L'architecture **LoRaWAN** classique repose sur une topologie appelée *star-of-stars*.

Dans cette topologie, les communications entre les objets et le réseau sont réalisées en un seul saut radio. Un capteur **LoRaWAN** transmet directement vers une ou plusieurs passerelles situées à portée, et ces passerelles relaient ensuite les données vers le serveur réseau au moyen d'une connexion **IP**. Cette architecture est simple et robuste lorsque la couverture radio est suffisante, mais elle ne prévoit pas, dans son fonctionnement standard, qu'un capteur relaie les messages d'un autre capteur. La topologie **LoRaWAN** standard doit donc être distinguée d'une véritable topologie mesh, dans laquelle chaque nœud peut également jouer le rôle de routeur [15, 18, 20, 21, 22].

Les objets connectés, appelés *end devices*, communiquent directement avec une ou plusieurs passerelles **LoRaWAN**. Les passerelles reçoivent les messages radio **LoRa** et les transmettent ensuite à un serveur réseau via une connexion **IP**. Cette connexion **IP** peut être réalisée par Ethernet, Wi-Fi, réseau cellulaire, fibre optique ou satellite. La passerelle agit donc comme un pont transparent entre la couche radio **LoRa** et l'infrastructure réseau **IP**.

Un point important est qu'un objet **LoRaWAN** n'est pas associé à une passerelle unique. Lorsqu'un *end device* émet un message, celui-ci peut être reçu par toutes les passerelles situées à portée radio. Ces passerelles transmettent ensuite le message au serveur réseau. Si plusieurs copies du même message sont reçues, le serveur réseau effectue une déduplication et ne conserve qu'un seul exemplaire. Cette approche améliore la robustesse du réseau, car la réception d'un message ne dépend pas d'une seule passerelle.

L'architecture **LoRaWAN** est généralement composée de quatre éléments principaux. Le premier est l'*end device*, qui correspond au capteur ou à l'actionneur. Il est souvent alimenté par batterie et cherche donc à réduire au maximum sa consommation énergétique. Le deuxième élément est la passerelle, qui reçoit les messages **LoRa** et les transfère vers le réseau **IP**. Le troisième élément est le *Network Server*, qui gère le réseau, vérifie l'intégrité des messages, supprime les

doublons, sélectionne la passerelle appropriée pour les messages descendants et gère certains paramètres radio. Le quatrième élément est l'*Application Server*, qui reçoit les données applicatives et les traite selon les besoins de l'application. Dans les versions récentes de **LoRaWAN**, un *Join Server* intervient également dans la procédure d'activation et dans la génération des clés de session [23].

La couche **MAC** **LoRaWAN** utilise un accès au canal de type ALOHA. Cela signifie que les objets peuvent transmettre lorsqu'ils ont une donnée à envoyer, sans réservation préalable stricte du canal. Cette simplicité réduit la complexité des objets et leur consommation, mais elle augmente le risque de collisions lorsque le nombre de nœuds croît. Deux objets qui transmettent simultanément sur le même canal, avec des paramètres radio incompatibles, peuvent se perturber mutuellement. Les différents facteurs d'étalement offrent une certaine séparation entre les transmissions, mais cette orthogonalité n'est pas parfaite en pratique. La capacité du réseau dépend donc du nombre d'objets, de la fréquence des messages, du choix des *spreading factors*, du nombre de passerelles et des contraintes réglementaires.

LoRaWAN distingue les messages montants, appelés *uplinks*, et les messages descendants, appelés *downlinks*. Les uplinks sont envoyés par les end devices vers le réseau. Les downlinks sont envoyés par le réseau vers les end devices. Dans les applications **IoT** classiques, le trafic est généralement très asymétrique : les objets envoient beaucoup plus de messages qu'ils n'en reçoivent. Cette asymétrie convient bien à **LoRaWAN**, car les messages descendants sont plus contraignants. Une passerelle qui transmet un downlink ne peut généralement pas écouter simultanément les uplinks sur le même canal, et elle est, elle aussi, soumise aux limitations réglementaires de temps d'émission.

LoRaWAN définit trois classes d'end devices : A, B et C. La classe A est obligatoire pour tous les appareils **LoRaWAN**. Elle est la plus économe en énergie. Un appareil de classe A dort la plupart du temps, émet un message lorsqu'il a une donnée à transmettre, puis ouvre deux courtes fenêtres de réception, appelées RX1 et RX2. Si aucun message descendant n'est reçu pendant ces fenêtres, l'appareil retourne en veille. Cette classe est particulièrement adaptée aux capteurs autonomes alimentés par batterie, mais elle présente une latence importante pour les communications descendantes, car le réseau ne peut répondre qu'après un uplink.

La classe B étend la classe A en ajoutant des fenêtres de réception planifiées, appelées *ping slots*. Ces fenêtres sont synchronisées à l'aide de balises envoyées par le réseau. La classe B permet donc de réduire la latence des downlinks, tout en conservant une consommation plus faible que la classe C. Elle est utile pour des applications dans lesquelles le réseau doit pouvoir contacter les objets à des moments prévisibles.

La classe C maintient la réception ouverte presque en permanence, sauf lorsque l'objet est en train d'émettre. Elle offre donc la plus faible latence pour les messages descendants. En contrepartie, elle consomme beaucoup plus d'énergie que les classes A et B. Elle est donc généralement réservée aux équipements alimentés par le secteur ou par une source d'énergie suffisante, comme certains actionneurs, relais ou passerelles.

L'activation d'un appareil **LoRaWAN** peut se faire principalement de deux manières : **OTAA**, pour *Over-The-Air Activation*, ou **ABP**, pour *Activation By Personalization*. L'activation **OTAA** est généralement recommandée, car elle permet de générer dynamiquement les clés de session lors de l'association de l'objet au réseau. L'objet envoie une requête d'association, appelée *Join-request*, et reçoit ensuite une réponse du réseau, appelée *Join-accept*. À partir de cette procédure, les clés de session nécessaires à la communication sont dérivées. L'activation **ABP** consiste à programmer directement dans l'objet les paramètres nécessaires à la communication, notamment l'adresse de l'appareil et les clés de session. Cette méthode est plus simple, mais moins flexible et moins robuste sur le plan de la sécurité.

La sécurité est un élément central de **LoRaWAN**. Le protocole utilise l'algorithme AES-128

et repose sur plusieurs clés. Dans **LoRaWAN** 1.0, les principales clés sont l'*AppKey*, la *Network Session Key* et l'*Application Session Key*. La clé réseau sert notamment à vérifier l'intégrité des messages à l'aide d'un code d'intégrité, tandis que la clé applicative sert à chiffrer et déchiffrer la charge utile applicative. Cette séparation permet au réseau de gérer le transport des messages sans nécessairement accéder au contenu applicatif. Les compteurs de trames permettent également de limiter les attaques par rejeu, puisqu'un message ancien réémis avec un compteur déjà utilisé peut être rejeté.

LoRaWAN définit aussi des paramètres régionaux. En Europe, la bande EU863-870 utilise notamment trois canaux par défaut à 868.10 MHz, 868.30 MHz et 868.50 MHz, avec une bande passante de 125 kHz. Les débits associés aux data rates DR0 à DR5 vont d'environ 250 bit/s pour DR0, correspondant à $SF12/BW125$, à environ 5470 bit/s pour DR5, correspondant à $SF7/BW125$. La puissance maximale rayonnée équivalente est typiquement limitée à +16 dBm EIRP dans la bande EU863-870. Ces valeurs dépendent toutefois du plan de fréquences régional et des contraintes réglementaires applicables.

Le temps d'occupation du canal est également limité. En Europe, une limitation typique du *duty cycle* à 1% signifie qu'un objet ne peut pas transmettre plus de 1% du temps sur une sous-bande donnée. Sur une journée complète, cela correspond à :

$$T_{max} = 24 \times 3600 \times 0.01 = 864 \text{ s} \quad (2.9)$$

Un appareil soumis à une limitation de 1% ne peut donc pas dépasser environ 864 s d'émission par jour sur la sous-bande concernée. Cette contrainte est essentielle dans **LoRaWAN** car les transmissions à haut facteur d'étalement occupent longtemps le canal. Un message envoyé en $SF = 12$ consomme beaucoup plus d'airtime qu'un message envoyé en $SF = 7$. Un mauvais choix de spreading factor peut donc réduire fortement la capacité du réseau.

Ces contraintes deviennent encore plus importantes dans une architecture multi-sauts. En effet, un paquet relayé occupe le canal plusieurs fois : une première fois lors de son émission par le nœud source, puis à chaque retransmission par un nœud intermédiaire. Le gain de couverture obtenu par l'ajout de relais doit donc être mis en balance avec l'augmentation de l'occupation du canal, la consommation énergétique supplémentaire des relais et le risque accru de collisions. Les travaux portant sur le routage **LoRa** tiennent ainsi compte de contraintes spécifiques, comme l'asymétrie entre uplink et downlink, la limite de duty cycle de 1 % en Europe et les fenêtres de réception imposées par **LoRaWAN** après chaque transmission montante [15, 24].

Pour optimiser l'utilisation des ressources radio, **LoRaWAN** peut utiliser un mécanisme appelé **Adaptive Data Rate**. L'**ADR** permet au serveur réseau d'adapter certains paramètres de transmission de l'end device, notamment le data rate, la puissance d'émission et le nombre de retransmissions. Le data rate correspond ensuite, selon les paramètres régionaux, à une combinaison de modulation, de spreading factor et de bande passante. Lorsqu'un objet est proche d'une passerelle et bénéficie d'un lien radio favorable, le réseau peut lui demander d'utiliser un facteur d'étalement plus faible et une puissance d'émission réduite. Cela diminue le temps d'occupation du canal, réduit la consommation énergétique et limite les interférences. À l'inverse, un objet éloigné ou soumis à un canal défavorable peut utiliser un spreading factor plus élevé afin d'augmenter sa robustesse.

L'**ADR** est surtout adapté aux objets fixes ou aux objets dont les conditions radio varient lentement. Pour un objet mobile, le canal peut changer rapidement, ce qui rend l'adaptation plus difficile. Dans ce cas, les paramètres déterminés à partir de mesures précédentes peuvent devenir inadaptés. Cette limite est importante dans les environnements variables ou lorsque les objets sont mobiles.

LoRaWAN présente plusieurs avantages pour les réseaux de capteurs. Il permet de couvrir

de grandes distances, consomme peu d'énergie, fonctionne dans des bandes non licenciées et dispose d'une architecture largement standardisée. Il offre également une sécurité intégrée et une bonne séparation entre la gestion réseau et les données applicatives. Ces propriétés en font une solution pertinente pour des capteurs environnementaux autonomes, notamment en milieu rural ou forestier.

En revanche, **LoRaWAN** présente aussi des limites importantes. La première est son faible débit. Le protocole est adapté à des messages courts, mais pas à des flux de données importants. La deuxième est la latence, en particulier pour les objets de classe A, qui ne peuvent recevoir un message descendant qu'après avoir transmis un uplink. La troisième est la capacité du réseau, limitée par l'accès ALOHA, les collisions, les interférences, le duty cycle et la durée importante des transmissions à haut spreading factor. Enfin, **LoRaWAN** n'est pas un protocole maillé dans son architecture standard. Les end devices communiquent directement avec les passerelles, et non entre eux.

Cette limite explique l'intérêt académique pour les extensions multi-sauts de **LoRaWAN**. Même si **LoRa** offre déjà une très grande portée, certaines situations peuvent nécessiter l'ajout de relais intermédiaires : zones très isolées, relief défavorable, obstacles importants, forêt dense ou volonté de réduire le nombre de passerelles connectées à Internet. Dans ce cas, un ou plusieurs nœuds intermédiaires peuvent être utilisés pour relayer les paquets jusqu'à une passerelle. Cilfone et al. [15] soulignent cependant que le nombre de sauts envisagé reste généralement limité, précisément parce que **LoRa** possède déjà une grande portée en communication directe.

Plusieurs travaux expérimentaux illustrent cette volonté d'adapter **LoRa** à des communications multi-sauts. Bor et al. [25] proposent par exemple **LoRaBlink**, une couche **MAC** alternative permettant des communications multi-sauts dans un réseau de faible densité, avec un trafic réduit et un nombre limité de nœuds. Lundell et al. [24] étudient, quant à eux, un protocole de routage pour réseaux **LoRa** inspiré de mécanismes utilisés dans les réseaux maillés Wi-Fi. Dias et Grilo [26] proposent une extension multi-hop uplink de **LoRaWAN**, dans laquelle des nœuds relais transmettent les données de nœuds feuilles vers une passerelle. Ces travaux montrent que le multi-hop **LoRa** est techniquement possible, mais qu'il reste associé à des compromis importants en matière de débit, de fiabilité, de consommation et de complexité protocolaire.

Dans le cadre de ce mémoire, **LoRaWAN** constitue donc une technologie de référence pour les capteurs de détection d'incendie. Elle est très adaptée à l'envoi de mesures environnementales ou d'alertes ponctuelles, car elle combine faible consommation et longue portée. Toutefois, son architecture standard peut devenir limitante lorsque les capteurs sont déployés dans une forêt étendue, dense ou difficilement accessible, où tous les nœuds ne disposent pas nécessairement d'un lien direct fiable vers une passerelle connectée à Internet. Cette limite justifie l'étude de solutions complémentaires, comme l'utilisation de passerelles maillées ou de smartphones réutilisés comme relais intermédiaires.

2.2 Bluetooth

Bluetooth est une technologie de communication sans fil à courte portée fonctionnant dans la bande **ISM** à 2.4 GHz. Initialement conçue comme une alternative aux connexions câblées entre équipements personnels, elle a progressivement évolué vers une famille de technologies couvrant des usages aussi différents que la transmission audio, les échanges de données entre périphériques et les applications de l'Internet des objets. Le standard Bluetooth regroupe principalement Bluetooth Classic, également appelé **BR/EDR** pour **Basic Rate/Enhanced Data Rate**, et Bluetooth Low Energy, généralement abrégé **BLE** ou Bluetooth LE [27].

Bluetooth Classic est historiquement associé aux applications nécessitant un flux de données relativement continu, telles que les casques audio, les haut-parleurs sans fil ou les systèmes

mains libres. Il utilise 79 canaux espacés de 1 MHz dans la bande **ISM** à 2.4 GHz et repose sur un mécanisme d'étalement de spectre par sauts de fréquence, appelé **Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)**. La modulation dépend du mode physique employé : le mode **BR** utilise une modulation **GFSK** avec un débit brut de 1 Mb/s, tandis que les modes **EDR** utilisent les modulations $\pi/4$ -**DQPSK** et **8DPSK**, permettant respectivement des débits bruts de 2 Mb/s et 3 Mb/s [27].

Le saut de fréquence constitue un élément central du fonctionnement de Bluetooth. La bande **ISM** à 2.4 GHz est partagée par de nombreux systèmes, notamment le Wi-Fi, ZigBee, certains protocoles propriétaires et les fours à micro-ondes. Plutôt que de transmettre continuellement sur une fréquence unique, les dispositifs Bluetooth changent régulièrement de canal selon une séquence déterminée par le protocole. Cette diversité fréquentielle limite l'influence d'une perturbation localisée sur une partie du spectre et améliore ainsi la robustesse globale de la liaison.

D'un point de vue architectural, la pile Bluetooth est divisée en deux grandes parties : le contrôleur et l'hôte. Le contrôleur regroupe les fonctions les plus proches de la radio, notamment la couche physique et la couche de liaison. Il assure l'émission et la réception des signaux radio, la sélection des canaux, le respect des contraintes temporelles et le traitement des paquets de bas niveau. L'hôte contient les couches supérieures, parmi lesquelles L2CAP, les mécanismes de sécurité, les profils et les services applicatifs. Ces deux parties communiquent généralement au moyen de l'interface **HCI**, pour **Host Controller Interface**, qui permet à l'hôte de piloter le contrôleur.

Le modèle de communication de Bluetooth Classic convient particulièrement aux applications dans lesquelles un équipement transmet un flux régulier vers un autre, par exemple lorsqu'un smartphone envoie un signal audio vers un casque. Cette approche est cependant moins adaptée aux objets alimentés sur batterie qui restent en veille pendant de longues périodes et ne transmettent que quelques octets de manière ponctuelle. Bluetooth Low Energy a précisément été développé afin de répondre à ce type de besoin.

2.2.1 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy est une variante de Bluetooth conçue pour les applications nécessitant une faible consommation énergétique. Contrairement au Bluetooth Classic, optimisé pour la transmission de flux relativement continus, le **BLE** privilégie des échanges courts et espacés par de longues périodes d'inactivité radio. Cette différence d'objectif explique une grande partie des différences d'architecture et de fonctionnement entre les deux technologies [28].

Organisation fréquentielle et couches physiques

Bluetooth Low Energy utilise la bande **ISM** comprise entre 2400 MHz et 2483.5 MHz. Il exploite 40 canaux **RF** espacés de 2 MHz, dont les fréquences centrales s'étendent de 2402 MHz à 2480 MHz. Si ces emplacements fréquentiels sont numérotés séquentiellement par un indice physique m , sans faire référence à la numérotation logique définie par Bluetooth, leur fréquence centrale peut s'écrire :

$$f_m = 2402 + 2m \text{ MHz} \quad m \in \{0, \dots, 39\} \quad (2.10)$$

La précision concernant l'indice m est importante, car la numérotation logique des canaux **BLE** ne suit pas directement leur ordre fréquentiel. Les canaux de données sont numérotés de 0 à 36, tandis que les trois canaux d'advertising primaires portent les numéros 37, 38 et 39 et sont situés respectivement à 2402 MHz, 2426 MHz et 2480 MHz [29].

Les trois canaux d'advertising primaires sont principalement utilisés pour l'annonce de présence, la découverte des dispositifs et l'établissement initial d'une connexion. Les 37 autres canaux sont utilisés pour les échanges de données et peuvent également servir de canaux secondaires dans certaines procédures d'advertising étendu. Lorsqu'une connexion est établie, les échanges successifs suivent une séquence de sauts de fréquence. Si un canal est momentanément perturbé, les paquets suivants peuvent ainsi être transmis sur d'autres fréquences moins dégradées. Cette diversité fréquentielle améliore la robustesse de la liaison face aux interférences localisées, sans toutefois supprimer les pertes dues à l'atténuation, au masquage, à l'orientation des antennes ou à une perturbation affectant une grande partie de la bande.

La modulation de base du **BLE** est une modulation **GFSK**. Plusieurs couches physiques, ou **PHY**, peuvent être utilisées. LE 1M offre un débit brut de 1 Mb/s et doit obligatoirement être supportée par tout contrôleur **BLE**. LE 2M, introduite avec Bluetooth 5, porte ce débit à 2 Mb/s et réduit le temps d'émission des paquets, au prix d'une sensibilité généralement moins favorable lorsque le bilan de liaison est faible. LE Coded **PHY** conserve un débit symbole de 1 Msym/s, mais ajoute un codage correcteur d'erreurs et de la redondance afin d'améliorer la robustesse de la communication. Le support de LE 2M et de LE Coded **PHY** est optionnel [29, 30].

Modes de communication et organisation des données

La communication **BLE** peut fonctionner selon un mode non connecté, fondé sur l'advertising et le scanning, ou selon un mode connecté. En advertising, un dispositif diffuse périodiquement des paquets courts afin d'annoncer sa présence ou de transmettre une quantité limitée d'information. Un autre dispositif écoute les canaux concernés pendant des fenêtres de scanning afin de détecter ces annonces. Ce fonctionnement convient notamment à la découverte de périphériques, aux balises et à certaines transmissions occasionnelles. En mode connecté, un dispositif initie une connexion avec un équipement qui annonce sa présence. Les données sont ensuite échangées pendant des événements de connexion planifiés [31, 32].

La distinction entre les rôles *central* et *peripheral* intervient lors de l'établissement et du maintien de la liaison radio. Le périphérique diffuse des annonces connectables et accepte une demande de connexion, tandis que le central scanne l'environnement et initie cette connexion. Dans un usage classique, un smartphone joue souvent le rôle de central et un capteur celui de périphérique. Ces rôles ne doivent pas être confondus avec les rôles **GATT** client et **GATT** server, qui décrivent l'accès aux données applicatives. Un équipement central peut donc être serveur **GATT** ou client **GATT** selon l'architecture de l'application [32, 33].

Les échanges applicatifs reposent généralement sur **ATT**, pour **Attribute Protocol**, et **GATT**, pour **Generic Attribute Profile**. Les données sont organisées sous forme de services et de caractéristiques. Un service regroupe un ensemble cohérent de fonctions ou de données tandis qu'une caractéristique représente une valeur particulière telle qu'une température, un niveau de batterie ou un état d'alerte. Un client **GATT** peut notamment lire ou écrire une caractéristique, ou s'abonner à ses mises à jour. Une notification transmet une nouvelle valeur sans confirmation au niveau **ATT** tandis qu'une indication exige une confirmation de réception [33].

Événements de connexion, consommation et débit applicatif

En mode connecté, les échanges sont organisés autour de *connection events*. Deux événements successifs sont séparés par un intervalle de connexion, noté T_{CI} . À chaque événement, les deux dispositifs activent leur radio, échangent éventuellement plusieurs paquets, puis peuvent retourner en veille jusqu'à l'événement suivant. Le choix de T_{CI} détermine donc un compromis entre latence, débit et consommation. Un intervalle court permet des échanges plus fréquents et réduit la latence, mais augmente le nombre de réveils radio. Un intervalle long diminue l'activité

moyenne de la radio, au prix d'une latence plus élevée [32, 34].

La consommation moyenne peut être approximée à partir des durées passées en émission, en réception et en veille :

$$I_{\text{avg}} = \frac{I_{\text{TX}}T_{\text{TX}} + I_{\text{RX}}T_{\text{RX}} + I_{\text{sleep}}T_{\text{sleep}}}{T_{\text{CI}}} \quad (2.11)$$

avec :

$$T_{\text{sleep}} = T_{\text{CI}} - T_{\text{TX}} - T_{\text{RX}} \quad (2.12)$$

Cette expression met en évidence l'influence du rapport cyclique radio. Une diminution de l'intervalle de connexion ou une augmentation du temps passé en émission et en réception accroît la consommation moyenne. À l'inverse, de longues périodes de veille permettent de réduire fortement l'énergie consommée lorsque le trafic applicatif est faible.

Le périphérique peut en outre utiliser une latence de périphérique, notée N_{lat} , qui l'autorise à ne pas participer à plusieurs événements de connexion consécutifs lorsqu'il n'a aucune donnée à transmettre. L'intervalle maximal entre deux réveils peut alors être approximé par :

$$T_{\text{eff}} = (N_{\text{lat}} + 1) T_{\text{CI}} \quad (2.13)$$

Cette possibilité doit rester compatible avec le *connection supervision timeout*, c'est-à-dire la durée maximale pendant laquelle aucun paquet valide ne peut être reçu avant que la connexion soit déclarée perdue. Les paramètres doivent notamment respecter la condition :

$$T_{\text{timeout}} > 2(N_{\text{lat}} + 1) T_{\text{CI}} \quad (2.14)$$

Le choix conjoint de T_{CI} , de N_{lat} et de T_{timeout} constitue donc un compromis entre réactivité, consommation et stabilité de la connexion [32, 35].

Le débit réellement disponible pour l'application reste inférieur au débit brut de la **PHY**. Une partie du temps de transmission est consacrée aux préambules, aux en-têtes, au **CRC**, aux intervalles inter-trames, aux acquittements de la couche liaison et aux éventuelles retransmissions. Le débit dépend également du nombre de paquets qui peuvent être échangés durant chaque événement de connexion. Une approximation simple s'écrit :

$$R_{\text{app}} \approx \frac{8N_{\text{pkt}}L_{\text{payload}}}{T_{\text{CI}}} \quad (2.15)$$

où N_{pkt} représente le nombre de paquets applicatifs transmis pendant un intervalle de connexion et L_{payload} la charge utile applicative de chaque paquet, exprimée en octets.

Cette relation permet de visualiser l'influence de l'intervalle de connexion et du nombre de paquets échangés, mais elle reste optimiste. Le débit utile dépend aussi du **MTU** **ATT**, de la taille maximale des **PDU** de la couche liaison, de la durée disponible pendant l'événement de connexion, de la **PHY** utilisée et de la qualité du canal radio. Lorsque le lien se dégrade, les retransmissions de la couche liaison diminuent le débit applicatif et augmentent la consommation. Dans le cas de LE Coded **PHY**, l'allongement du temps d'air réduit encore le débit maximal, mais peut améliorer la probabilité de réception lorsque le rapport signal sur bruit est faible.

Sélection de la **PHY**, puissance d'émission et sensibilité

Après l'établissement d'une connexion **BLE**, la couche liaison peut modifier la **PHY** utilisée grâce à la *PHY Update procedure*, lorsque cette fonction est supportée par les deux contrôleurs. La procédure peut être initiée à la demande de l'hôte ou par la couche liaison et permet de modifier la **PHY** d'émission, la **PHY** de réception, ou les deux. Les deux directions d'une liaison ne sont donc pas nécessairement contraintes d'utiliser la même **PHY**. Cette procédure est particulièrement importante dans le cadre d'une expérimentation entre smartphones : le support matériel de LE Coded **PHY** ne garantit pas que chaque connexion l'utilise automatiquement. Il convient donc de vérifier, au moyen de l'**API**, de l'application de mesure ou des journaux du contrôleur, que la **PHY** négociée correspond bien à celle recherchée [36].

La spécification Bluetooth LE définit des niveaux de puissance d'émission compris dans une plage pouvant aller de -20 dBm à $+20$ dBm. Un contrôleur donné ne doit toutefois pas nécessairement proposer l'ensemble de cette plage, et la puissance réellement utilisable reste soumise aux limitations matérielles et aux réglementations applicables dans la bande **ISM**. Une puissance excessive à très courte distance peut également saturer le récepteur. Le mécanisme LE Power Control peut, lorsqu'il est disponible, adapter la puissance d'émission en fonction de la qualité du lien [29].

Du point de vue du bilan de liaison, la sensibilité du récepteur est déterminante. La spécification Bluetooth Core 5.4 impose des niveaux minimaux de conformité de -70 dBm pour les **PHY** LE non codées, de -75 dBm pour LE Coded **PHY** avec $S = 2$, et de -82 dBm pour LE Coded **PHY** avec $S = 8$. Ces niveaux correspondent à des exigences minimales d'interopérabilité et non aux performances typiques de tous les circuits disponibles, certains récepteurs pouvant présenter une sensibilité plus favorable [29].

La Table 2.1 résume les principales différences entre Bluetooth Classic et Bluetooth Low Energy.

Paramètre	Bluetooth Classic	Bluetooth Low Energy
Bande de fréquence	ISM à 2.4 GHz	ISM à 2.4 GHz
Organisation des canaux	79 canaux espacés de 1 MHz	40 canaux espacés de 2 MHz
Usage principal	Flux continu, audio et échanges point-à-point	Capteurs, IoT et échanges courts
Modulations	GFSK , $\pi/4$ - DQPSK et 8DPSK	GFSK
Débits physiques	De 1 à 3 Mb/s	De 125 kb/s à 2 Mb/s selon la PHY
Gestion de l'énergie	Adaptée aux communications relativement continues	Optimisée pour de longues périodes de veille
Modes d'échange usuels	Connexions point-à-point	Advertising, scanning et connexions central/périphérique

TABLE 2.1 – Comparaison synthétique entre Bluetooth Classic et Bluetooth Low Energy [27, 28].

Pour un réseau dans lequel des smartphones réutilisés jouent le rôle de relais, Bluetooth Low Energy présente plusieurs avantages. La technologie est intégrée nativement dans les smartphones modernes, ne nécessite pas de module radio externe, fonctionne dans une bande non licenciée et offre une latence relativement faible. Elle reste toutefois sensible aux interférences présentes à 2.4 GHz, au masquage par les obstacles, aux effets du corps humain, aux trajets multiples et à l'orientation des antennes intégrées. Dans un environnement forestier, la portée

réelle doit par conséquent être déterminée expérimentalement plutôt que déduite uniquement des performances annoncées.

2.2.2 Bluetooth 5 Coded PHY

Bluetooth 5 a introduit LE Coded PHY afin d'améliorer la robustesse et la portée des communications Bluetooth Low Energy sans augmenter nécessairement la puissance d'émission. Cette PHY ajoute un codage correcteur d'erreurs et de la redondance aux données transmises. Le récepteur dispose ainsi davantage d'informations pour reconstruire un paquet affecté par le bruit ou par certaines erreurs de transmission. Cette amélioration est obtenue au prix d'une diminution du débit nominal et d'une augmentation du temps d'occupation du canal [34, 37].

Débit symbole et schémas de codage

LE Coded PHY conserve un débit symbole de :

$$R_s = 1 \text{ Msym/s} \quad (2.16)$$

Deux schémas de codage sont disponibles pour la partie variable du paquet : $S = 2$ et $S = 8$. Le paramètre S représente le nombre résultant de symboles transmis par bit d'information avant prise en compte des champs fixes du paquet. Le débit binaire nominal de la partie codée peut donc être approximé par :

$$R_b = \frac{R_s}{S} \quad (2.17)$$

Pour $S = 2$, le débit nominal vaut :

$$R_b = \frac{1 \text{ Msym/s}}{2} = 500 \text{ kb/s} \quad (2.18)$$

tandis que, pour $S = 8$, il devient :

$$R_b = \frac{1 \text{ Msym/s}}{8} = 125 \text{ kb/s} \quad (2.19)$$

Ces valeurs ne représentent pas directement le débit applicatif, car elles ne tiennent pas compte des champs fixes du paquet, des intervalles inter-trames, des acquittements ni des retransmissions. Elles décrivent le débit nominal obtenu pour les bits soumis au schéma de codage considéré [29].

Structure du paquet et mécanisme de codage

Un paquet LE Coded PHY se compose d'un préambule non codé, suivi de deux blocs protégés par le codage FEC. Le premier bloc, appelé *FEC Block 1*, contient l'*Access Address*, le *Coding Indicator* et la séquence de terminaison TERM1. Ce bloc est toujours transmis avec le schéma le plus robuste, soit $S = 8$. Le second bloc, appelé *FEC Block 2*, contient le PDU, le CRC et la séquence TERM2. Il est codé en $S = 2$ ou en $S = 8$ selon la valeur du *Coding Indicator* [36, 38].

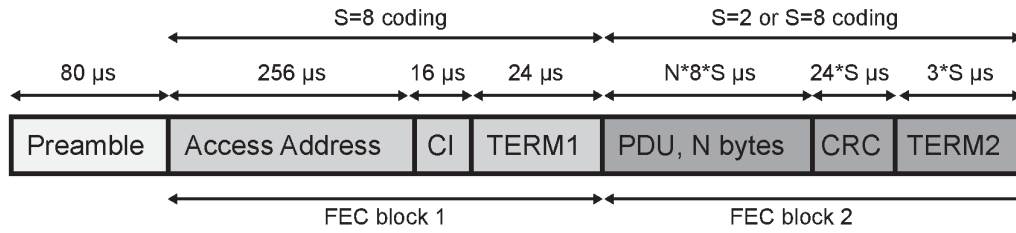


FIGURE 2.1 – Format de paquet de couche liaison pour la couche physique codée LE [36]

Le *Coding Indicator*, ou **CI**, indique au récepteur le schéma utilisé pour le second bloc. La valeur $CI = 0b00$ correspond à $S = 8$, tandis que $CI = 0b01$ correspond à $S = 2$. Les autres valeurs sont réservées. Les informations nécessaires à l'identification et au décodage du paquet sont donc toujours transmises avec le codage le plus robuste, tandis que la charge utile peut utiliser un compromis différent entre robustesse et temps d'air.

Le mécanisme de codage comprend deux opérations successives. La première est un code convolutif **FEC** de rendement $1/2$, non systématique et non récursif, dont la longueur de contrainte vaut $K = 4$. Deux polynômes générateurs sont définis :

$$a_0(x) = 1 + x + x^2 + x^3 \quad (2.20)$$

et :

$$a_1(x) = 1 + x^2 + x^3 \quad (2.21)$$

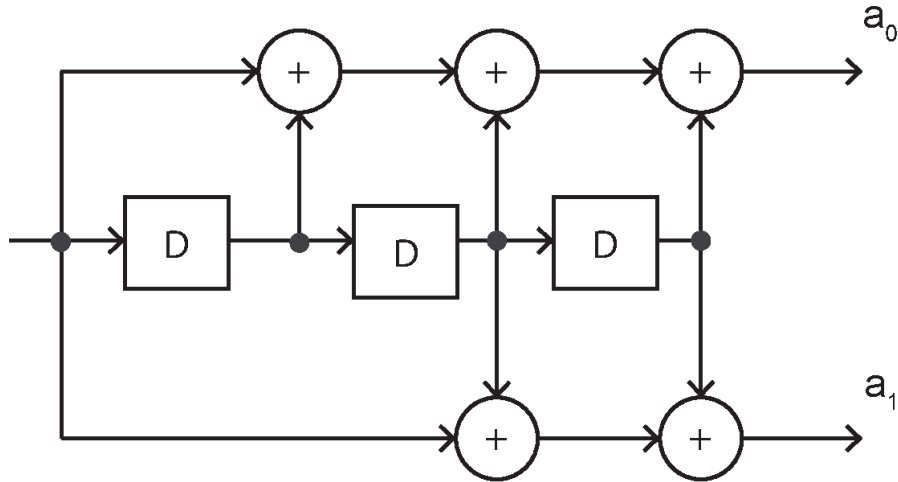


FIGURE 2.2 – Encodeur de correction d'erreur direct convolutif [36]

Pour chaque bit d'entrée, le codeur produit deux bits codés. Le bit associé à a_0 est transmis avant celui associé à a_1 . L'état initial du codeur est nul. Les séquences TERM1 et TERM2 contiennent trois bits de terminaison qui ramènent le codeur dans cet état et permettent de terminer correctement le décodage [36].

La seconde opération est le *pattern mapping*. Pour le schéma $S = 2$, le facteur de mapping vaut $P = 1$: chacun des deux bits issus du code convolutif est transmis sous la forme d'un symbole. Un bit d'information conduit donc à deux symboles transmis. Pour le schéma $S = 8$, le facteur vaut $P = 4$: un bit codé égal à 0 est remplacé par la séquence 0011, tandis qu'un bit codé égal à 1 est remplacé par la séquence 1100. Les deux bits produits par le codeur convolutif donnent

alors huit symboles transmis par bit d'information. La relation entre le schéma de codage et le facteur de mapping s'écrit ainsi :

$$S = 2P \quad (2.22)$$

avec $P = 1$ pour $S = 2$ et $P = 4$ pour $S = 8$.

Cette structure montre que LE Coded **PHY** ne repose pas sur une simple répétition brute de chaque bit. La robustesse résulte de la combinaison du code convolutif, qui introduit une redondance exploitable par le décodeur, et du *pattern mapping*, qui augmente encore la durée et la structure du signal associé à chaque bit d'information.

Sensibilité et gain de portée

L'ajout de redondance permet au récepteur de fonctionner avec un signal plus faible que celui requis par les **PHY** non codées. D'après les exigences minimales de la spécification, la sensibilité passe de -70 dBm pour une **PHY** non codée à -75 dBm pour $S = 2$ et à -82 dBm pour $S = 8$. Par rapport à la valeur minimale des **PHY** non codées, les gains de bilan de liaison correspondants valent donc approximativement 5 dB et 12 dB [29].

Le lien entre cette amélioration et la portée peut être étudié à l'aide du modèle log-distance :

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.23)$$

où n est l'exposant de pertes de propagation. Si un changement de **PHY** apporte un gain de bilan de liaison ΔLB , le rapport théorique entre les distances maximales devient :

$$\frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{\Delta LB}{10n}} \quad (2.24)$$

En espace libre, pour lequel $n \approx 2$, un gain de 5 dB conduit à :

$$\frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{5}{20}} \approx 1.78 \quad (2.25)$$

tandis qu'un gain de 12 dB donne :

$$\frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{12}{20}} \approx 3.98 \quad (2.26)$$

Ces valeurs sont cohérentes avec les ordres de grandeur généralement annoncés pour LE Coded **PHY**, soit environ deux fois la portée avec $S = 2$ et jusqu'à quatre fois avec $S = 8$ dans des conditions proches de l'espace libre [37]. Ces facteurs ne constituent toutefois pas des garanties. Dans un environnement réel, l'exposant n est souvent supérieur à 2. Pour $n = 3$, les mêmes gains conduisent respectivement à :

$$10^{\frac{5}{30}} \approx 1.47 \quad (2.27)$$

et :

$$10^{\frac{12}{30}} \approx 2.51 \quad (2.28)$$

En forêt, la végétation, l'humidité, les obstacles, les effets de masquage, les trajets multiples et l'orientation des antennes peuvent donc réduire fortement le gain de distance. LE Coded PHY améliore le bilan de liaison, mais ne supprime pas les mécanismes de propagation défavorables propres à la bande 2.4 GHz.

Temps d'air et consommation énergétique

Le principal coût de LE Coded PHY est l'augmentation du temps d'air. Pour une longue charge utile, la durée de la partie variable du paquet est approximativement multipliée par deux avec $S = 2$ et par huit avec $S = 8$ par rapport à une transmission à un symbole par bit. Le rapport exact appliqué au paquet complet est différent, car le préambule et le premier bloc FEC possèdent leur propre durée fixe et ne suivent pas le même facteur que la charge utile.

La durée totale dépend donc du schéma de codage, du type de PDU et du nombre d'octets transmis. La spécification indique que la durée d'un paquet LE Coded PHY peut s'étendre approximativement de $462 \mu s$ à $17\,040 \mu s$ selon sa configuration. La valeur la plus élevée correspond à un paquet long utilisant le codage le plus robuste. LE Coded PHY et en particulier $S = 8$, peut par conséquent occuper le canal beaucoup plus longtemps qu'une PHY non codée [36].

L'énergie consommée par paquet peut être représentée de manière simplifiée par :

$$E_{\text{pkt}} \approx V I_{\text{radio}} T_{\text{air}} \quad (2.29)$$

où V est la tension d'alimentation, I_{radio} le courant moyen pendant l'activité radio et T_{air} le temps d'air. Si la puissance instantanée de la radio reste comparable, l'augmentation de T_{air} accroît directement l'énergie nécessaire pour transmettre un paquet. L'utilisation de $S = 8$ n'est donc pas systématiquement la solution la moins énergivore.

Ce raisonnement doit néanmoins tenir compte des retransmissions. Lorsqu'une liaison LE 1M est fortement dégradée, plusieurs tentatives peuvent être nécessaires avant qu'un paquet soit reçu correctement. Un paquet plus long transmis en LE Coded PHY peut alors consommer moins d'énergie qu'une succession de transmissions non codées échouées. Le choix de la PHY doit donc prendre en compte le taux de pertes de paquets, le nombre moyen de retransmissions, la taille de la charge utile, la fréquence des échanges et le bilan de liaison réel [34].

Dans le contexte d'un système de détection d'incendie, les messages sont généralement courts et peu fréquents. L'augmentation du temps d'air peut dès lors être acceptable si elle améliore suffisamment la fiabilité de la communication. En revanche, dans un réseau dense ou soumis à un trafic fréquent, l'utilisation systématique de $S = 8$ peut augmenter la consommation, réduire la capacité globale du canal et accroître le risque de collisions ou de congestion.

La Table 2.2 synthétise les principales caractéristiques des PHY BLE pertinentes pour ce travail.

PHY	Débit nominal	Codage	Effet principal
LE 1M	1 Mb/s	Non codé	PHY de base obligatoire
LE 2M	2 Mb/s	Non codé	Débit accru et temps d'air réduit
LE Coded $S = 2$	500 kb/s	FEC et 2 symboles par bit	Robustesse accrue avec surcoût modéré
LE Coded $S = 8$	125 kb/s	FEC et 8 symboles par bit	Robustesse maximale et temps d'air élevé

TABLE 2.2 – Comparaison des principales couches physiques Bluetooth Low Energy [29, 34, 37].

Dans le cadre de ce mémoire, LE Coded PHY présente un intérêt particulier, car il est disponible sur certains smartphones récents et peut améliorer la portée sans nécessiter de module radio externe. Il offre ainsi une possibilité de transformer des smartphones réutilisés en relais de communication locaux. Plusieurs limites doivent cependant être prises en compte. Premièrement, son support est optionnel et doit être vérifié séparément pour chaque appareil. Deuxièmement, les API du système d'exploitation ne donnent pas toujours un contrôle ou une visibilité complets sur les paramètres effectivement utilisés par le contrôleur. Troisièmement, la portée dépend fortement de l'environnement, de l'orientation des antennes, du niveau d'interférence et du mode de communication employé.

LE Coded PHY ne doit donc pas être considéré comme une technologie longue portée équivalente à LoRa ou à d'autres technologies sub-GHz. Son fonctionnement à 2.4 GHz le rend généralement plus sensible à l'atténuation par les obstacles et la végétation. Il présente néanmoins deux avantages importants pour ce travail : son intégration native dans certains smartphones Android et une latence potentiellement plus faible que celle de nombreuses technologies LPWAN. Il constitue ainsi un compromis pertinent pour des communications locales entre smartphones, en particulier lorsque les messages sont courts, peu fréquents et que la robustesse du lien est prioritaire par rapport au débit.

2.3 Wi-Fi

Le Wi-Fi est une famille de technologies de réseau local sans fil fondées sur les normes IEEE 802.11. Il permet à des équipements situés dans une même zone géographique, tels que des ordinateurs, des smartphones, des capteurs ou des points d'accès, d'échanger des données au moyen d'ondes radio et, le plus souvent, d'accéder à un réseau IP ou à Internet. Le terme Wi-Fi désigne plus précisément une marque et un programme de certification d'interopérabilité gérés par la Wi-Fi Alliance, tandis que l'IEEE définit les spécifications techniques des couches physique et MAC. Il est donc plus exact de considérer IEEE 802.11 comme la famille de normes et Wi-Fi comme leur principale mise en œuvre commerciale [39, 40, 41, 42].

Le nom Wi-Fi est parfois développé sous la forme *Wireless Fidelity*. Cette interprétation apparaît encore dans certaines sources anciennes, mais elle ne constitue pas une signification officielle de l'appellation. Le nom a surtout été choisi afin de fournir une désignation commerciale plus accessible que les références techniques IEEE 802.11. Depuis 2018, les principales générations sont également identifiées par un numéro simplifié : IEEE 802.11n correspond ainsi à Wi-Fi 4, IEEE 802.11ac à Wi-Fi 5, IEEE 802.11ax à Wi-Fi 6 et IEEE 802.11be à Wi-Fi 7 [39, 41, 42].

Les normes IEEE 802.11 définissent une couche de contrôle d'accès au médium, ou couche MAC, commune à plusieurs couches physiques. La couche MAC organise notamment l'accès au

canal radio, l'adressage, les acquittements, les retransmissions, l'association des stations et la gestion de la sécurité. Les différentes couches physiques définissent, quant à elles, les bandes de fréquences, les largeurs de canal, les modulations, les codages, les formats des signaux et les débits disponibles. Cette séparation permet de faire évoluer les techniques radio tout en conservant une architecture de réseau et des mécanismes de liaison largement communs [42].

2.3.1 Architecture d'un réseau Wi-Fi

Un équipement participant à un réseau IEEE 802.11 est appelé une station et noté STA. Une station peut être un terminal utilisateur, un capteur, un ordinateur ou un point d'accès. Dans le mode infrastructure, qui constitue aujourd'hui le mode de fonctionnement le plus courant, une station particulière joue le rôle de point d'accès, noté AP. Celui-ci assure la coordination de la cellule radio et sert généralement de pont entre le réseau sans fil et un système de distribution, par exemple un réseau Ethernet [41, 42, 43].

L'ensemble formé par un point d'accès et les stations qui lui sont associées constitue un Basic Service Set (BSS). Le BSS est identifié au niveau radio par un BSSID, généralement dérivé d'une adresse MAC du point d'accès. Le nom logique présenté à l'utilisateur est le Service Set Identifier (SSID). Plusieurs points d'accès peuvent diffuser le même SSID et être reliés par un système de distribution afin de former un Extended Service Set (ESS). Cette architecture permet d'étendre la zone de couverture et d'autoriser le déplacement d'une station entre plusieurs points d'accès, sous réserve que les mécanismes d'authentification, de réassociation et de mobilité soient correctement configurés.

Dans une infrastructure classique, les trames échangées entre deux stations associées au même point d'accès transitent normalement par celui-ci. Le point d'accès joue donc un rôle central dans la distribution des données, la gestion du médium et l'application des politiques de sécurité. Dans un réseau d'entreprise, plusieurs AP peuvent être administrés par un contrôleur centralisé ou une plateforme de gestion dans le cloud. Cette organisation facilite le choix des canaux, le réglage des puissances, l'authentification des utilisateurs, l'équilibrage de charge et la continuité de service lors des déplacements [41].

La famille IEEE 802.11 prévoit également des communications sans infrastructure classique. Dans un Independent Basic Service Set (IBSS), les stations communiquent directement sans point d'accès central. Ce mode ad hoc historique reste toutefois peu utilisé dans les systèmes grand public modernes. Des mécanismes tels que Wi-Fi Direct permettent également une communication directe entre équipements, tandis que l'amendement IEEE 802.11s définit la formation de réseaux maillés multi-sauts entre stations compatibles. Dans un réseau maillé, certaines stations relaient les trames d'autres stations, ce qui permet d'étendre la couverture sans disposer d'une liaison filaire pour chaque point radio [42].

Bandes de fréquences et organisation des canaux

Le Wi-Fi conventionnel utilise principalement les bandes situées autour de 2.4 GHz, 5 GHz et, pour les générations les plus récentes, 6 GHz. Ces bandes sont divisées en canaux dont la disponibilité, la puissance maximale et les conditions d'utilisation dépendent du domaine réglementaire. Un canal autorisé aux États-Unis ne l'est donc pas nécessairement en Europe, et certaines fréquences peuvent imposer des mécanismes particuliers de détection et de sélection de fréquence [39, 42].

La bande 2.4 GHz présente une propagation généralement plus favorable que les bandes supérieures. Elle traverse mieux certains obstacles et permet souvent d'obtenir une couverture plus étendue à puissance comparable. Elle ne dispose cependant que d'une quantité limitée

de spectre et est partagée avec de nombreuses autres technologies, dont Bluetooth, ZigBee et certains équipements industriels ou domestiques. Les canaux Wi-Fi y sont espacés de 5 MHz, mais une transmission occupe typiquement une largeur d'au moins 20 MHz. Plusieurs canaux numérotés se recouvrent donc spectralement, ce qui limite le nombre de canaux réellement utilisables simultanément dans une même zone.

La bande 5 GHz offre davantage de canaux non superposés et autorise des largeurs de canal plus importantes. Elle convient mieux aux transmissions à haut débit et aux déploiements denses, mais son atténuation par les murs, les obstacles et la végétation est généralement supérieure à celle observée à 2.4 GHz. Certaines parties de cette bande sont également partagées avec des systèmes radar. Les équipements doivent alors appliquer le mécanisme **DFS** pour **Dynamic Frequency Selection**, afin de quitter le canal lorsqu'un radar prioritaire est détecté.

La bande 6 GHz a été introduite commercialement avec Wi-Fi 6E, puis pleinement exploitée par Wi-Fi 7. Elle offre un ensemble de canaux supplémentaires et permet notamment l'utilisation de canaux de 320 MHz avec **IEEE** 802.11be. Son utilisation dépend cependant des décisions réglementaires nationales. Les bandes effectivement ouvertes, les puissances permises et le nombre de canaux larges disponibles ne sont donc pas identiques dans tous les pays. Les fréquences plus élevées et les canaux très larges favorisent le débit à courte distance, mais rendent la liaison plus exigeante en matière de rapport signal à bruit et de planification radio [41, 44, 45].

Un canal large est construit par agrégation de canaux élémentaires de 20 MHz. Les générations récentes peuvent utiliser des largeurs de 20, 40, 80 ou 160 MHz, et Wi-Fi 7 porte la largeur maximale à 320 MHz dans la bande 6 GHz. Une augmentation de la bande passante permet théoriquement de transporter davantage de données, mais augmente également la puissance de bruit intégrée au récepteur. Celle-ci peut être approximée par :

$$P_N = kTB \quad (2.30)$$

où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue et B la bande passante du récepteur. En décibels, doubler la largeur de bande augmente le bruit thermique intégré d'environ 3 dB. Un canal plus large n'est donc réellement avantageux que si la puissance reçue, la qualité du canal et la disponibilité spectrale permettent d'exploiter les modulations correspondantes.

Couche physique : **OFDM**, modulation et codage

Les premières variantes de Wi-Fi ont utilisé différentes techniques de modulation et d'étalement de spectre. **IEEE** 802.11b reposait principalement sur le **DSSS** et le **CCK** dans la bande 2.4 GHz. **IEEE** 802.11a a introduit l'**OFDM** dans la bande 5 GHz, puis **IEEE** 802.11g a transposé cette technique dans la bande 2.4 GHz. Depuis lors, l'**OFDM** constitue le principe dominant des couches physiques Wi-Fi à haut débit [41, 46, 42].

L'**OFDM** divise le canal radio en un ensemble de sous-porteuses étroites. Chacune transporte une partie des données avec une modulation numérique telle que **BPSK**, **QPSK** ou **QAM**. Les sous-porteuses sont choisies de manière orthogonale sur la durée utile du symbole. Leur espacement vérifie idéalement :

$$\Delta f = \frac{1}{T_u} \quad (2.31)$$

où Δf représente l'espacement fréquentiel entre deux sous-porteuses et T_u la durée utile du symbole **OFDM**. Cette orthogonalité permet aux spectres des sous-porteuses de se chevaucher sans provoquer d'interférence mutuelle dans les conditions idéales de synchronisation.

Avant chaque symbole **OFDM**, un intervalle de garde contenant généralement une copie de la fin du symbole est ajouté. Ce préfixe cyclique limite l'interférence intersymbole causée par les trajets multiples. Dans un environnement intérieur ou forestier, le signal reçu est en effet la somme de plusieurs copies retardées issues des réflexions, diffractions et diffusions. L'intervalle de garde doit être suffisamment long pour absorber l'essentiel de cette dispersion temporelle. Un intervalle plus long améliore la robustesse, mais réduit la proportion du temps réellement consacrée aux données.

Le nombre de bits transportés par chaque sous-porteuse dépend de l'ordre de modulation. Pour une modulation M -**QAM**, le nombre théorique de bits représentés par un symbole vaut :

$$N_{\text{bits/symbole}} = \log_2(M) \quad (2.32)$$

Une modulation 64-**QAM** transporte ainsi 6 bits par symbole, une modulation 256-**QAM** en transporte 8, une modulation 1024-**QAM** en transporte 10 et une modulation 4096-**QAM** en transporte 12. L'augmentation de l'ordre de modulation rapproche cependant les points de la constellation. Le récepteur doit donc distinguer des amplitudes et des phases plus proches, ce qui nécessite un rapport signal à bruit plus élevé et une chaîne radio plus linéaire.

La modulation est associée à un codage correcteur d'erreurs. Chaque combinaison de modulation et de rendement de code forme un **Modulation and Coding Scheme (MCS)**. Lorsque le canal est favorable, le système peut utiliser une modulation d'ordre élevé et un code à rendement important afin d'augmenter le débit. Lorsque le signal est faible ou perturbé, il sélectionne un **MCS** plus robuste, fondé sur une modulation plus simple et davantage de redondance. Cette adaptation dynamique explique pourquoi le débit observé diminue généralement avec la distance, les obstacles ou les interférences.

Le débit physique peut être représenté de manière simplifiée par [47] :

$$R_{\text{PHY}} \approx \frac{N_{\text{SD}} N_{\text{BPSC}} R_c N_{\text{SS}}}{T_u + T_{\text{GI}}} \quad (2.33)$$

où N_{SD} est le nombre de sous-porteuses de données, N_{BPSC} le nombre de bits codés par sous-porteuse, R_c le rendement du code correcteur, N_{SS} le nombre de flux spatiaux, T_u la durée utile du symbole et T_{GI} l'intervalle de garde. Cette expression met en évidence les principaux moyens utilisés par les générations successives pour augmenter le débit : élargir le canal, augmenter l'ordre de modulation, améliorer le codage, réduire l'overhead temporel ou transmettre plusieurs flux spatiaux en parallèle [48, 49].

MIMO, formation de faisceau et accès multi-utilisateur

La technologie **MIMO**, pour **Multiple-Input Multiple-Output**, utilise plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Lorsque les trajets radio sont suffisamment indépendants, plusieurs flux de données peuvent être transmis simultanément dans le même canal fréquentiel. Ce mécanisme, appelé multiplexage spatial, augmente le débit sans nécessiter une largeur de bande proportionnellement plus importante. Le nombre de flux utilisables est limité par le nombre d'antennes, le rang du canal radio et les capacités des deux équipements.

De manière simplifiée, le débit peut croître proportionnellement au nombre de flux spatiaux :

$$R_{\text{MIMO}} \approx N_{\text{SS}} R_{\text{SISO}} \quad (2.34)$$

où R_{SISO} est le débit obtenu avec un seul flux. Cette relation représente un cas idéal. En pratique, les corrélations entre les antennes, le bruit, les interférences, les erreurs d'estimation

du canal et les limitations matérielles réduisent le gain réellement obtenu.

Les antennes multiples permettent également la formation de faisceau, ou *beamforming*. Le transmetteur ajuste la phase et l'amplitude des signaux envoyés par ses différentes antennes afin que leurs contributions s'additionnent favorablement dans la direction du récepteur. La formation de faisceau n'augmente pas nécessairement le nombre de flux, mais améliore la puissance utile reçue et réduit certaines interférences.

Le SU-MIMO transmet plusieurs flux à un seul utilisateur. Le MU-MIMO répartit au contraire les flux spatiaux entre plusieurs stations et permet au point d'accès de les servir simultanément. IEEE 802.11ac a notamment introduit le MU-MIMO en liaison descendante, tandis qu'IEEE 802.11ax a étendu les transmissions multi-utilisateurs aux liaisons montantes et les a combinées avec l'OFDMA [48, 41].

L'OFDMA, pour *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, divise un canal OFDM en groupes de sous-porteuses appelés *Resource Units (RU)*. Le point d'accès peut attribuer différentes RU à plusieurs stations au cours d'une même transmission. Contrairement au fonctionnement historique dans lequel une seule station occupe l'ensemble du canal, l'OFDMA permet de transmettre simultanément plusieurs petits paquets et améliore l'efficacité dans les environnements denses. Cette technique est particulièrement utile lorsque de nombreux équipements génèrent un trafic de faible volume, car elle limite le gaspillage associé à l'occupation d'un canal très large par une seule petite trame.

Couche MAC et accès au médium

Un réseau Wi-Fi partage un médium radio commun entre plusieurs stations. Contrairement à Ethernet filaire historique, une station radio ne peut généralement pas détecter de manière fiable une collision pendant qu'elle transmet. Elle utilise donc un mécanisme d'évitement des collisions, appelé CSMA/CA pour *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* [42].

Avant d'émettre, une station écoute le canal. Si le médium reste libre pendant la durée inter-trame requise, elle choisit un compteur aléatoire dans une fenêtre de contention. Le temps d'attente supplémentaire vaut :

$$T_{BO} = N_{BO}T_{slot} \quad (2.35)$$

avec :

$$N_{BO} \in \{0, \dots, CW\} \quad (2.36)$$

où T_{slot} est la durée d'un créneau et CW la fenêtre de contention. Le compteur diminue uniquement lorsque le canal est libre. Si une autre station commence à transmettre, le compteur est gelé, puis reprend lorsque le médium redevient disponible. Ce tirage aléatoire réduit la probabilité que plusieurs stations commencent une transmission au même instant.

Après la réception correcte d'une trame unicast, le destinataire envoie généralement un acquittement, ou ACK. Si l'émetteur ne reçoit pas cet acquittement, il considère que la trame a été perdue et peut la retransmettre. La fenêtre de contention est alors augmentée afin de réduire le risque d'une nouvelle collision. Ce mécanisme améliore la fiabilité, mais les retransmissions augmentent la latence, réduisent le débit utile et consomment davantage d'énergie.

Les trames RTS et CTS, pour *Request to Send* et *Clear to Send*, peuvent être utilisées avant une transmission de données. Elles réservent virtuellement le canal et réduisent l'effet des nœuds cachés, c'est-à-dire des stations qui ne s'entendent pas mutuellement mais qui peuvent toutes

deux perturber un même récepteur. Cette procédure ajoute toutefois un overhead important et n'est avantageuse que lorsque le risque ou le coût des collisions sont suffisamment élevés.

La couche **MAC** distingue les trames de gestion, de contrôle et de données. Les trames de gestion assurent notamment la découverte du réseau, l'authentification, l'association et la mobilité. Les trames de contrôle comprennent par exemple les **ACK**, **RTS** et **CTS**. Les trames de données transportent les paquets issus des couches supérieures. Les générations modernes autorisent également l'agrégation de plusieurs unités de données dans une même transmission, ce qui réduit le nombre de préambules, d'acquittements et de contentions nécessaires.

La fonction **EDCA** introduit plusieurs catégories d'accès associées à des priorités différentes. La voix et la vidéo peuvent utiliser des paramètres de contention plus favorables que le trafic de fond. Ce mécanisme fournit une qualité de service relative, mais ne garantit pas à lui seul une latence déterministe. La performance reste dépendante du nombre de stations, de la charge du canal, des interférences et des conditions de propagation.

Découverte, association et échange de données

Un point d'accès diffuse périodiquement des trames balises, ou *beacons*, contenant notamment le **SSID**, les capacités radio, les paramètres de sécurité et des informations de synchronisation. Une station peut découvrir les réseaux en écoutant passivement ces balises. Elle peut également effectuer un balayage actif en envoyant des requêtes de sondage, auxquelles les points d'accès répondent.

Après avoir sélectionné un réseau, la station réalise les procédures d'authentification et d'association définies par la couche **MAC**. Dans un réseau protégé, une phase supplémentaire établit les clés cryptographiques. Une fois la liaison sécurisée, les protocoles des couches supérieures peuvent attribuer une adresse **IP** puis établir les communications applicatives.

Le débit affiché par le système correspond généralement au débit de la couche physique, et non au débit réellement disponible pour l'application. Chaque échange comporte des préambules, des en-têtes **PHY** et **MAC**, des intervalles inter-trames, des temps de contention, des acquittements et parfois des retransmissions. Le rendement peut être défini par :

$$\eta = \frac{R_{\text{app}}}{R_{\text{PHY}}} \quad (2.37)$$

où R_{app} est le débit applicatif et R_{PHY} le débit physique. Le rendement diminue notamment lorsque les paquets sont courts, lorsque le canal est fortement chargé ou lorsque le taux de retransmission augmente. Un débit physique de plusieurs gigabits par seconde ne garantit donc pas un débit applicatif équivalent.

Consommation énergétique et portée

Le Wi-Fi a été conçu initialement pour fournir un débit élevé dans un réseau local. Une interface Wi-Fi reste souvent active afin d'écouter les balises, de surveiller le canal et de maintenir son association. Sa consommation est par conséquent généralement supérieure à celle de technologies pensées dès l'origine pour des capteurs très sobres, telles que Bluetooth Low Energy ou certaines technologies **LPWAN**.

Plusieurs mécanismes permettent néanmoins de réduire l'activité radio. Les modes d'économie d'énergie historiques autorisent une station à dormir entre certaines balises, tandis que le point d'accès met temporairement ses trames en mémoire. **IEEE 802.11ax** a introduit le **Target Wake Time (TWT)**, qui permet au point d'accès et à la station de négocier des périodes de réveil

planifiées. Une station [IoT](#) peut ainsi désactiver son récepteur pendant une durée connue et se réveiller uniquement au moment prévu pour transmettre ou recevoir [\[48\]](#).

La portée dépend de la fréquence, de la puissance d'émission, des gains d'antennes, de la sensibilité du récepteur, du [MCS](#) utilisé et de l'environnement. Le bilan de liaison peut être représenté par :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL - L \quad (2.38)$$

où P_r est la puissance reçue, P_t la puissance émise, G_t et G_r les gains des antennes, PL les pertes de propagation et L les pertes supplémentaires. Lorsque P_r diminue, le système sélectionne généralement un [MCS](#) plus robuste. La connexion peut donc rester active à une distance où le débit maximal n'est plus disponible.

Dans un environnement forestier, la végétation, l'humidité, la hauteur des antennes, l'orientation des smartphones et les trajets multiples peuvent fortement modifier la portée. Les bandes 5 et 6 GHz permettent des débits élevés, mais subissent généralement une atténuation plus importante que la bande 2.4 GHz. Pour une application de relais entre smartphones, le Wi-Fi conventionnel présente l'avantage d'une intégration native, d'un débit élevé et d'un transport direct des paquets [IP](#). Il nécessite toutefois une gestion attentive de la consommation, des interférences et de la stabilité des liaisons.

Sécurité des réseaux Wi-Fi

Le caractère diffus du médium radio rend les transmissions Wi-Fi accessibles à tout récepteur situé dans la zone de couverture. La sécurité doit donc assurer l'authentification des stations, la confidentialité des données, leur intégrité et la protection contre la répétition de trames. La simple dissimulation du [SSID](#) ou le filtrage des adresses [MAC](#) ne constitue pas une protection suffisante, car ces informations peuvent être observées ou falsifiées.

Le protocole WPA2 a généralisé les mécanismes issus d'[IEEE](#) 802.11i et le chiffrement AES-CCMP. WPA3 améliore l'authentification personnelle au moyen de SAE, pour *Simultaneous Authentication of Equals*, et renforce la protection des réseaux d'entreprise et des trames de gestion.

Dans un réseau personnel, l'ensemble des utilisateurs partage souvent une phrase secrète. Dans un réseau d'entreprise, l'authentification [IEEE](#) 802.1X et [EAP](#) permet d'identifier individuellement les utilisateurs ou les équipements, généralement avec l'aide d'un serveur RADIUS. Cette architecture facilite la révocation des accès, la journalisation et l'attribution dynamique de politiques réseau. Les trames de gestion protégées réduisent en outre l'efficacité de certaines attaques de désauthentification ou de désassociation [\[42\]](#), [\[40\]](#).

La cryptographie ne protège cependant pas contre toutes les menaces. Un brouillage radio, une saturation du canal ou une forte interférence peuvent empêcher la communication même si les données sont correctement chiffrées. La sécurité d'un réseau Wi-Fi doit donc combiner des mécanismes cryptographiques modernes, une configuration correcte, une segmentation du réseau, des mises à jour logicielles et une surveillance de l'environnement radio.

2.3.2 Évolution des principales générations

Les évolutions successives de Wi-Fi ont principalement augmenté le débit, l'efficacité spectrale, le nombre d'utilisateurs servis simultanément et la capacité de fonctionnement dans des environnements denses. La Table [2.3](#) résume les principales générations destinées aux réseaux locaux conventionnels.

Norme	Génération	Bandes	Largeur maximale	Débit PHY indicatif	Évolutions principales
IEEE 802.11b	Héritage	2.4 GHz	Environ 20 MHz	11 Mb/s	DSSS et CCK ; première diffusion commerciale massive.
IEEE 802.11a/g	Héritage	5 GHz pour 11a; 2.4 GHz pour 11g	20 MHz	54 Mb/s	Introduction puis généralisation de l' OFDM .
IEEE 802.11n	Wi-Fi 4	2.4 et 5 GHz	40 MHz	600 Mb/s	MIMO , agrégation de canaux et agrégation de trames.
IEEE 802.11ac	Wi-Fi 5	5 GHz	160 MHz	Environ 6.9 Gb/s	256-QAM, canaux larges et MU-MIMO descendant.
IEEE 802.11ax	Wi-Fi 6 / 6E	2.4, 5 et 6 GHz pour 6E	160 MHz	Environ 9.6 Gb/s	OFDMA , 1024-QAM, MU-MIMO montant et descendant, BSS coloring et TWT .
IEEE 802.11be	Wi-Fi 7	2.4, 5 et 6 GHz	320 MHz	Environ 23 Gb/s avec 8 flux	4096-QAM, MLO , MRU , puncturing et améliorations de latence.

TABLE 2.3 – Évolution synthétique des principales générations de Wi-Fi [41, 42, 44, 45].

Ces valeurs correspondent à des maxima physiques obtenus avec les configurations les plus favorables, notamment un grand nombre de flux spatiaux, une largeur de canal maximale, un intervalle de garde court et le **MCS** le plus élevé. Les smartphones et points d'accès courants disposent généralement de moins de flux spatiaux et n'exploitent pas toujours les canaux les plus larges. Le débit réel est donc nettement inférieur à la limite théorique.

Wi-Fi 7 et **IEEE** 802.11be

Il convient de distinguer la révision générale **IEEE** 802.11-2024, qui consolide la couche **MAC** et plusieurs couches physiques, de l'amendement **IEEE** 802.11be-2024 consacré à l'*Extremely High Throughput* (EHT). Ce dernier constitue la base technique de Wi-Fi 7. Bien que son millésime soit 2024, la publication officielle de l'amendement a eu lieu le 22 juillet 2025. À la date de rédaction, Wi-Fi 7 demeure la génération Wi-Fi finalisée la plus récente. Le projet **IEEE** 802.11bn, associé à Wi-Fi 8 et à l'*Ultra High Reliability*, est encore en cours de normalisation et ne constitue pas une norme achevée [50, 44].

Cette formulation n'implique pas qu'aucun amendement **IEEE** 802.11 plus récent n'ait été publié. Certains amendements spécialisés, par exemple ceux consacrés à la détection radio ou au positionnement, peuvent avoir une date de publication ultérieure. Ils ne remplacent toutefois pas Wi-Fi 7 comme génération principale destinée à augmenter le débit et les performances générales des **WLAN**.

Wi-Fi 7 poursuit deux objectifs principaux : augmenter fortement le débit maximal et améliorer la latence ainsi que la fiabilité. La norme conserve les bandes 2.4, 5 et 6 GHz, tout en exploitant particulièrement les possibilités offertes par la bande 6 GHz. Elle vise des applications telles que les transmissions vidéo à très haute définition, la réalité augmentée ou virtuelle, les communications industrielles et les services interactifs sensibles à la latence [49, 45].

La première amélioration importante est l'utilisation de canaux atteignant 320 MHz. Cette largeur double le maximum de Wi-Fi 6 et Wi-Fi 6E. Elle permet approximativement de doubler le débit à nombre de flux et **MCS** identiques. Son utilisation est toutefois limitée à la bande 6 GHz et dépend fortement de la quantité de spectre autorisée dans le pays concerné. Dans un déploiement dense, l'utilisation généralisée de canaux aussi larges réduit le nombre de canaux indépendants disponibles et peut augmenter les interférences entre cellules.

Wi-Fi 7 introduit également la modulation 4096-QAM, ou 4K-QAM. Chaque symbole transporte alors 12 bits, contre 10 bits avec la 1024-QAM de Wi-Fi 6. À rendement de codage identique, l'augmentation théorique vaut :

$$\frac{12 - 10}{10} = 20 \% \quad (2.39)$$

Ce gain n'est disponible que lorsque le rapport signal à bruit est très élevé. La 4096-QAM est donc surtout utilisée à courte distance, dans un canal propre et avec une chaîne radio de bonne qualité. Lorsque les conditions se dégradent, l'adaptation de débit sélectionne automatiquement un MCS inférieur.

La fonction la plus structurante de Wi-Fi 7 est le Multi-Link Operation (MLO). Un équipement multi-lien peut établir plusieurs liaisons radio appartenant à des bandes ou à des canaux différents et les gérer comme une connexion logique unique. Les liens peuvent être utilisés pour agréger le débit, répartir le trafic, sélectionner dynamiquement la liaison la moins encombrée ou transmettre des données redondantes. Le MLO peut ainsi améliorer simultanément le débit, la latence et la fiabilité, à condition que le point d'accès et la station disposent de plusieurs radios compatibles [44, 45, 49].

Wi-Fi 7 étend aussi l'OFDMA grâce aux Multiple Resource Units (MRU). Une même station peut recevoir plusieurs RU non nécessairement contiguës au sein d'un canal. Cette souplesse permet d'utiliser plus efficacement les fragments de spectre disponibles. Le *preamble puncturing* complète ce mécanisme : lorsqu'une partie d'un canal large est occupée ou perturbée, le point d'accès peut exclure les sous-canaux concernés et continuer à exploiter le reste du canal, au lieu d'abandonner toute la largeur.

Le débit maximal d'environ 23 Gb/s correspond à une configuration théorique comprenant huit flux spatiaux, un canal de 320 MHz et les MCS les plus élevés. La norme IEEE définit également au moins un mode capable de dépasser 30 Gbit/s au point d'accès de service MAC dans les configurations prévues par son objectif de projet. Ces chiffres ne représentent pas le débit d'un smartphone courant. Un terminal disposant de deux flux spatiaux et d'un canal moins large atteindra une valeur beaucoup plus faible, à laquelle il faut encore retrancher l'overhead de la couche MAC et des protocoles IP [44, 41].

Pour le système étudié dans ce mémoire, les bénéfices les plus pertinents de Wi-Fi 7 ne sont pas nécessairement les débits extrêmes. Le MLO, la sélection dynamique des liens, l'amélioration de l'utilisation spectrale et les mécanismes de latence peuvent être plus intéressants pour maintenir une liaison fiable entre équipements. La disponibilité de ces fonctions dépend cependant du matériel, des pilotes, du système d'exploitation et des API accessibles à l'application.

2.3.3 Wi-Fi HaLow

Wi-Fi HaLow est la désignation commerciale des systèmes fondés sur IEEE 802.11ah. Contrairement au Wi-Fi conventionnel, qui utilise principalement les bandes 2,4, 5 et 6 GHz, IEEE 802.11ah fonctionne dans des bandes sans licence situées sous 1 GHz. La fréquence exacte dépend de la région : les bandes les plus couramment citées sont notamment US-915, EU-868, KR-922 et JP-924. Cette différence empêche une compatibilité radio directe avec les points d'accès Wi-Fi conventionnels, mais améliore la propagation et permet de viser les applications IoT à longue portée [51, 52, 53].

L'objectif initial de l'amendement est de fournir une portée pouvant atteindre approximativement 1 km, tout en conservant un débit minimal supérieur à 100 kb/s. La technologie occupe ainsi une position intermédiaire entre le Wi-Fi local à haut débit, les réseaux personnels à courte portée et les technologies LPWAN. Elle conserve l'architecture IP et une grande partie des mé-

canismes [IEEE 802.11], tout en adaptant les couches PHY et MAC aux capteurs, aux messages peu fréquents et aux stations alimentées sur batterie.

Couche physique de Wi-Fi HaLow

La couche physique [IEEE 802.11ah] est dérivée de l'OFDM utilisé par [IEEE 802.11ac], avec une réduction approximative d'un facteur dix des paramètres fréquentiels. Les largeurs de canal prévues sont 1, 2, 4, 8 et 16 MHz. Dans les essais européens présentés par Maudet et al., les canaux exploités ont une largeur de 1 ou 2 MHz. La réduction de la largeur de bande diminue le débit maximal, mais réduit le bruit intégré et améliore la sensibilité du récepteur [47].

Pour une bande de 1 MHz, le système utilise 32 sous-porteuses, tandis qu'une bande de 2 MHz en utilise 64. La durée utile du symbole OFDM vaut $32 \mu\text{s}$ et l'intervalle de garde peut valoir 4 ou $8 \mu\text{s}$. Ces symboles sont nettement plus longs que ceux du Wi-Fi conventionnel à large bande. Cette adaptation augmente la robustesse face à certains effets de propagation et permet d'utiliser des canaux étroits dans les bandes sub-GHz.

Les MCS 0 à 7 utilisent différentes combinaisons de BPSK, QPSK, 16-QAM et 64-QAM. Un mode particulièrement robuste, MCS 10, est défini pour la bande de 1 MHz. Il utilise une modulation BPSK, un code de rendement 1/2 et une répétition temporelle conduisant à un rendement effectif de 1/4. Le débit physique minimal vaut alors environ 150 kb/s avec un intervalle de garde long, pour une sensibilité théorique pouvant atteindre environ -98 dBm [47].

Pour un seul flux spatial, les débits théoriques présentés par Maudet et al. sont compris entre 0.15 et 3.33 Mb/s sur un canal de 1 MHz, et entre 0.65 et 7.22 Mb/s sur un canal de 2 MHz, selon le MCS et l'intervalle de garde. Des canaux plus larges et plusieurs flux permettent des débits supérieurs, mais ils réduisent l'intérêt du mode le plus robuste et ne sont pas disponibles dans tous les domaines réglementaires.

La propagation plus favorable des fréquences sub-GHz peut être illustrée par les pertes en espace libre :

$$PL_{\text{FS}} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.40)$$

À distance identique, les pertes augmentent avec la fréquence f . Le rapport entre les pertes à 2.4 GHz et à 868 MHz vaut :

$$\Delta PL = 20 \log_{10} \left(\frac{2.4}{0.868} \right) \approx 8.8 \text{ dB} \quad (2.41)$$

Cette différence théorique contribue au gain de portée de Wi-Fi HaLow. L'avantage réel dépend toutefois des antennes, de la réglementation, des puissances autorisées et de l'environnement.

Adaptations de la couche MAC

La couche MAC conserve les principes DCF et EDCA du Wi-Fi, mais introduit plusieurs mécanismes destinés aux réseaux comportant un grand nombre de capteurs. L'espace d'identification des stations a été étendu et organisé hiérarchiquement afin de permettre l'association de plusieurs milliers de stations à un point d'accès. La technologie peut théoriquement prendre en charge jusqu'à 8191 stations associées, même si la capacité utile dépend du trafic généré et de l'implémentation [52, 53].

Le mécanisme **Restricted Access Window (RAW)** divise le temps d'accès en fenêtres attribuées à des groupes de stations. Seules les stations appartenant au groupe autorisé peuvent entrer en contention pendant leur fenêtre. Cette organisation réduit les collisions lorsqu'un grand nombre de capteurs souhaitent transmettre et permet au point d'accès d'adapter les ressources aux profils de trafic.

Le *Target Wake Time* permet de planifier les périodes pendant lesquelles une station doit activer sa radio. En dehors de ces périodes, le capteur peut rester en sommeil et éviter l'écoute permanente du canal. **IEEE 802.11ah** permet également l'agrégation des trames et définit des trames **NDP**, pour **Null Data Packet**, dont certains formats réduisent l'overhead de contrôle. Ces mécanismes visent à diminuer le temps d'activité radio et à améliorer l'efficacité énergétique [52, 53, 47].

Performances expérimentales

Les performances annoncées doivent être distinguées des résultats obtenus sur le terrain. Maudet et al. ont évalué des équipements commerciaux fondés sur le chipset Newracom NRC-7292 dans des environnements intérieur et extérieur. Les mesures ont porté sur le **RSSI**, le débit utile et le temps aller-retour, avec des canaux de 1 et 2 MHz dans la bande EU-868 [47].

Dans la campagne extérieure, une liaison a été maintenue jusqu'à environ 1 km avec une puissance d'émission de 23 dBm. Les auteurs ont également mesuré un débit proche de 6 Mb/s avec une bande de 2 MHz dans des conditions favorables. Ces résultats confirment qu'une liaison kilométrique est réalisable, mais ils ne signifient pas qu'un débit de plusieurs mégabits par seconde est disponible à la distance maximale. Le système adapte son **MCS** et son débit en fonction de la qualité du lien.

Les essais européens doivent également respecter les limites de puissance et les règles d'occupation de la bande. L'article indique une puissance de référence de 14 dBm pour les conditions réglementaires EU-868 considérées, alors que l'équipement de test pouvait fournir jusqu'à 23 dBm. Les résultats obtenus à la puissance maximale du module ne peuvent donc pas être transposés directement à toutes les installations réglementaires.

Intérêt et limites pour le mémoire

Wi-Fi HaLow possède plusieurs caractéristiques intéressantes pour un réseau de détection d'incendie. Son fonctionnement sub-GHz offre une meilleure propagation que le Wi-Fi conventionnel à 2.4, 5 ou 6 GHz. Il conserve un transport **IP** natif et propose des débits nettement supérieurs à ceux de nombreuses technologies **LPWAN**. Les mécanismes **RAW** et **TWT** sont adaptés aux capteurs qui transmettent de petits volumes de données de manière intermittente.

La technologie présente néanmoins des limites importantes dans le cadre d'un réseau fondé sur des smartphones réutilisés. Les smartphones conventionnels ne disposent généralement pas d'une radio **IEEE 802.11ah** intégrée. L'utilisation de Wi-Fi HaLow nécessite donc un chipset, un module ou une interface externe spécifique, ce qui réduit l'avantage lié à la réutilisation directe du matériel existant. La disponibilité commerciale reste également plus limitée que celle du Wi-Fi conventionnel, de Bluetooth ou de **LoRa**.

Les contraintes réglementaires sub-GHz varient fortement selon les régions. La puissance, la largeur des canaux et les règles d'accès au spectre peuvent limiter les performances. Enfin, même si **IEEE 802.11ah** est conçu pour réduire la consommation, une interface Wi-Fi HaLow complète reste plus complexe qu'une radio **LPWAN** très bas débit. Le choix entre Wi-Fi HaLow, Bluetooth LE Coded **PHY** et **LoRa** doit donc prendre en compte la portée, le débit, la consommation, la compatibilité matérielle, la latence et la densité de nœuds.

La Table 2.4 résume les principales différences entre le Wi-Fi conventionnel récent et Wi-Fi HaLow.

Paramètre	Wi-Fi conventionnel récent	Wi-Fi HaLow
Normes principales	IEEE 802.11ax et IEEE 802.11be	IEEE 802.11ah
Bandes	2,4, 5 et 6 GHz	Bandes sub-1 GHz dépendantes de la région
Largeurs de canal	De 20 à 320 MHz	1, 2, 4, 8 et 16 MHz
Objectif principal	Débit élevé et capacité des WLAN	Portée, IoT, grand nombre de stations et économie d'énergie
Débit	Jusqu'à plusieurs dizaines de gigabits par seconde au niveau PHY	D'environ 150 kb/s à plusieurs dizaines de mégabits par seconde selon la configuration
Portée typique visée	Réseau local ; généralement quelques dizaines de mètres par cellule	Jusqu'à environ 1 km dans des conditions favorables
Accès multi-utilisateur	OFDMA, MU-MIMO et MLO selon la génération	RAW, TWT et signalisation adaptée aux réseaux de capteurs
Compatibilité matérielle	Native dans les smartphones et ordinateurs modernes	Radio spécifique rarement intégrée aux smartphones conventionnels

TABLE 2.4 – Comparaison générale entre le Wi-Fi conventionnel et Wi-Fi HaLow [51, 44, 53, 47].

En conclusion, le Wi-Fi conventionnel constitue une technologie de réseau local à haut débit, largement intégrée aux smartphones et directement compatible avec les protocoles IP. Ses évolutions successives ont combiné élargissement des canaux, modulations d'ordre élevé, MIMO, OFDMA et gestion multi-lien. Wi-Fi 7 représente actuellement l'aboutissement de cette évolution avec des canaux de 320 MHz, la 4096-QAM et le MLO. Wi-Fi HaLow poursuit un objectif différent : sacrifier une partie du débit et utiliser des canaux sub-GHz étroits afin d'améliorer la portée, la capacité d'accueil des capteurs et l'efficacité énergétique. Il constitue une solution techniquement pertinente pour certains réseaux IoT, mais son absence dans la majorité des smartphones limite son application directe au système de relais étudié dans ce mémoire.

2.4 Réseaux cellulaires LTE et 5G

Les réseaux LTE et 5G appartiennent à la famille des réseaux cellulaires normalisés par le 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Contrairement au Wi-Fi ou au Bluetooth, qui permettent principalement des communications locales dans des bandes sans licence, un réseau cellulaire repose généralement sur des fréquences attribuées à un opérateur et une couverture organisée en cellules. Chaque cellule est desservie par une station de base, appelée eNodeB en LTE [54, 55] et gNodeB en 5G NR [56]. Le terminal mobile est désigné par le terme User Equipment (UE).

LTE, pour *Long Term Evolution*, a introduit une architecture entièrement fondée sur les principes suivants : la commutation de paquets IP, une interface radio OFDM, une allocation centralisée des ressources et l'utilisation du MIMO. La 5G conserve ces principes mais ajoute les modifications suivantes : une nouvelle interface radio appelée New Radio (NR), une numérologie adaptable, des bandes de fréquences plus larges, des réseaux d'antennes massifs et un cœur de réseau orienté services. Les deux technologies peuvent donc être comprises à partir de mêmes outils mathématiques : bilan de liaison, rapport signal sur interférences et bruit, OFDM modulation QAM, codage correcteur et traitement matriciel du MIMO.

2.4.1 Principes communs aux réseaux cellulaires

Le découpage du territoire en cellules permet de réutiliser les mêmes fréquences dans des zones différentes et d'augmenter la capacité totale du réseau. Cette réutilisation crée cependant des interférences entre cellules. La qualité d'une liaison est donc mieux représentée par le rapport signal sur interférences et bruit, ou **SINR**, que par la seule puissance reçue :

$$\gamma = \frac{P_s}{P_I + P_N} \quad (2.42)$$

où P_s est la puissance utile, P_I la puissance cumulée des interférences et P_N la puissance de bruit. Deux terminaux recevant une puissance similaire peuvent ainsi obtenir des débits très différents si leur niveau d'interférence n'est pas identique.

La puissance reçue est déterminée par le bilan de liaison :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL - L \quad (2.43)$$

où P_t est la puissance d'émission, G_t et G_r les gains d'antennes, PL les pertes de propagation et L les pertes supplémentaires. En espace libre, les pertes augmentent avec la distance d et la fréquence porteuse f selon :

$$PL_{FS}(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.44)$$

Cette relation explique pourquoi les bandes basses sont favorables à la couverture, tandis que les bandes plus élevées nécessitent généralement des cellules plus petites ou des gains d'antenne supérieurs.

La puissance de bruit thermique dans une bande B peut être approximée en dBm par :

$$P_N[\text{dBm}] \approx -174 + 10 \log_{10}(B) + NF \quad (2.45)$$

où NF est le facteur de bruit du récepteur. Une bande passante plus large permet de transmettre davantage de données, mais augmente le bruit intégré.

Pour un canal gaussien sans interférences, la capacité théorique est donnée par la formule de Shannon :

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.46)$$

Lorsque les interférences peuvent être assimilées à une contribution de bruit additif, cette relation peut être utilisée comme approximation en remplaçant le **SNR** par le **SINR** γ défini précédemment :

$$C \approx B \log_2(1 + \gamma) \quad (2.47)$$

Cette expression ne fournit pas directement le débit applicatif d'une connexion **LTE** ou 5G, car elle ne tient pas compte des pilotes, des canaux de contrôle, des retransmissions ou des limitations imposées par les modulations et codages normalisés. Elle permet néanmoins d'illustrer que le débit théorique augmente avec la bande passante et avec la qualité de la liaison [57].

Contrairement au Wi-Fi, dans lequel les stations entrent principalement en contention, **LTE** et 5G utilisent un planificateur placé dans la station de base. Celui-ci décide à chaque instant quel utilisateur peut transmettre, sur quelles ressources, avec quelle modulation, quel rendement de code et quel nombre de flux spatiaux. L'allocation peut tenir compte de la qualité instantanée

du canal, des priorités de service et de l'équité entre utilisateurs. Le réseau peut fonctionner en **FDD**, avec des bandes distinctes pour les liaisons montante et descendante, ou en **TDD**, avec une même fréquence partagée dans le temps.

2.4.2 Fonctionnement du réseau **LTE**

Architecture et gestion de la connexion

LTE se compose du réseau d'accès **E-UTRAN** et du cœur de réseau **EPC**. Le **E-UTRAN** contient les eNodeB, qui assurent les fonctions radio, la planification, les retransmissions, la commande de puissance et la mobilité entre cellules. Le cœur **EPC** comprend principalement le **MME** pour la signalisation et la mobilité, le **S-GW** et le **P-GW** pour l'acheminement des paquets, ainsi que le **HSS** pour les informations d'abonnement. Les données utilisateur et la signalisation suivent ainsi des chemins logiques séparés [58, 59].

Lorsqu'un terminal se connecte, il sélectionne une cellule, établit une connexion **RRC**, s'authentifie et reçoit un contexte dans le cœur de réseau. **LTE** distingue notamment les états **RRC_IDLE** et **RRC_CONNECTED**. Dans le premier, le terminal ne dispose pas de ressources radio dédiées et peut maintenir une grande partie de sa chaîne de réception inactive. Dans le second, il peut recevoir des allocations de ressources. Le mécanisme **DRX**, pour *Discontinuous Reception*, permet en outre d'éteindre périodiquement le récepteur. Si T_{on} est la durée d'écoute pendant un cycle T_{DRX} , le rapport cyclique vaut :

$$D_{RX} = \frac{T_{on}}{T_{DRX}} \quad (2.48)$$

Un cycle long réduit la consommation moyenne, mais augmente la latence avant la réception d'une donnée descendante.

Grille temps-fréquence et **OFDMA**

LTE prend en charge des porteuses comprises entre 1.4 et 20 MHz. En liaison descendante, il utilise l'**OFDMA** avec un espacement de sous-porteuses fixé à :

$$\Delta f = 15 \text{ kHz} \quad (2.49)$$

Une trame radio dure 10 ms et contient dix sous-trames de 1 ms. Un bloc de ressources physique comprend douze sous-porteuses pendant un slot de 0.5 ms, soit une largeur fréquentielle de :

$$B_{RB} = 12\Delta f = 180 \text{ kHz} \quad (2.50)$$

La grille est elle-même divisée en *resource elements*, chacun correspondant à une sous-porteuse pendant un symbole **OFDM**. Certains éléments transportent les données et d'autres les signaux de référence, la synchronisation ou les canaux de contrôle [60].

Pour un symbole **OFDM** discret de taille N , le signal temporel obtenu par transformée de Fourier inverse s'écrit :

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi kn/N} \quad (2.51)$$

où $X[k]$ est le symbole complexe affecté à la sous-porteuse k . Les sous-porteuses sont orthogonales lorsque leur espacement vérifie $\Delta f = 1/T_u$, avec T_u la durée utile du symbole. Leur spectre peut donc se chevaucher sans provoquer d'interférence mutuelle dans les conditions idéales de synchronisation.

Un préfixe cyclique est ajouté avant chaque symbole. S'il est plus long que l'étalement significatif des trajets, la convolution avec le canal devient circulaire. Après suppression du préfixe et application de la FFT, chaque sous-porteuse peut être modélisée par :

$$Y[k] = H[k]X[k] + W[k] \quad (2.52)$$

où $H[k]$ est la réponse fréquentielle du canal et $W[k]$ le bruit. L'égalisation peut alors être réalisée indépendamment sur chaque sous-porteuse, ce qui simplifie fortement la réception dans un canal à trajets multiples.

SC-FDMA en liaison montante

Un signal OFDM peut présenter des crêtes de puissance importantes. Son rapport de puissance crête à puissance moyenne (PAPR, pour Peak to Average Power Ratio) est défini par [61] :

$$\text{PAPR} = \frac{\max_n |x[n]|^2}{\mathbb{E}\{|x[n]|^2\}} \quad (2.53)$$

Un PAPR élevé impose à l'amplificateur du smartphone de fonctionner loin de sa saturation et réduit son rendement énergétique. LTE utilise donc en liaison montante le SC-FDMA, également appelé DFT-spread OFDM. Les symboles modulés sont d'abord transformés par une DFT :

$$D[k] = \sum_{m=0}^{M-1} d[m]e^{-j2\pi km/M} \quad (2.54)$$

puis placés sur les sous-porteuses de l'IFFT. Ce précodage répartit chaque symbole d'information sur l'ensemble des sous-porteuses attribuées et produit un signal dont l'enveloppe est plus proche de celle d'une modulation monoporteuse. Le SC-FDMA conserve ainsi l'égalisation fréquentielle de l'OFDM tout en présentant généralement un PAPR plus faible [62, 60].

Modulation, codage, HARQ et MIMO

LTE adapte la transmission à la qualité du canal en sélectionnant un MCS. Les modulations usuelles sont la QPSK, la 16-QAM, la 64-QAM et, dans certaines évolutions, la 256-QAM. Pour une constellation contenant M points, le nombre de bits par symbole vaut :

$$Q_m = \log_2(M) \quad (2.55)$$

Une modulation d'ordre élevé augmente le débit, mais nécessite un SINR plus important. Les données sont protégées par des turbo-codes et un mécanisme de *rate matching* [63]. En négligeant les éléments de ressources consacrés aux pilotes et au contrôle, et avec R_c le rendement du code, le nombre de bits utiles transportés par N_{RE} peut être approximé par :

$$N_{\text{info}} \approx N_{\text{RE}} Q_m R_c N_{\text{layers}} \quad (2.56)$$

où N_{layers} est le nombre de couches MIMO.

Le terminal mesure la qualité du canal et transmet un indicateur **CQI**. L'eNodeB choisit ensuite un **MCS** suffisamment élevé pour maximiser le débit mais suffisamment robuste pour limiter le taux d'erreur. Lorsqu'un bloc est mal reçu, le mécanisme **HARQ** transmet une nouvelle version de redondance [64]. Le récepteur combine alors les différentes observations avant de redécoder, ce qui évite d'appliquer dès la première transmission la redondance maximale.

Le modèle d'un canal **MIMO** s'écrit :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.57)$$

où **H** est la matrice du canal. Lorsque cette matrice possède plusieurs dimensions suffisamment indépendantes, plusieurs flux peuvent être transmis simultanément. Le **MIMO** peut donc fournir soit un gain de diversité afin d'améliorer la fiabilité, soit un gain de multiplexage afin d'augmenter le débit. **LTE-Advanced** complète ces mécanismes par l'agrégation de plusieurs porteuses permettant d'exploiter une largeur de bande totale supérieure à 20 MHz.

2.4.3 Fonctionnement du réseau 5G

Architecture, services et déploiements

La 5G vise trois grandes catégories de services : l'**eMBB** pour les hauts débits, l'**URLLC** pour les communications fiables et à faible latence et le **mMTC** pour la connexion d'un très grand nombre d'objets. Le réseau est constitué du **NG-RAN**, contenant les gNodeB, et du cœur **5GC**. Ce dernier adopte une architecture orientée services comprenant notamment l'**AMF** pour l'accès et la mobilité, la **SMF** pour les sessions, la **UPF** pour le plan utilisateur et l'**UDM** pour les données d'abonnement [56, 65].

Dans un déploiement non autonome **NSA**, la radio 5G **NR** est associée à un ancrage **LTE** et au cœur **EPC**. Cette solution a facilité les premiers déploiements, mais ne fournit pas toutes les fonctions du **5GC**. Dans un réseau autonome **SA**, le gNodeB est directement relié au cœur 5G. Il devient alors possible d'utiliser nativement les **QoS flows**, le *network slicing* et le placement local d'une **UPF** afin de réduire le trajet des paquets.

La 5G **NR** peut fonctionner sur un large ensemble de fréquences, allant des bandes sub-GHz, favorables à la couverture, à des fréquences beaucoup plus élevées permettant d'exploiter de grandes largeurs de bande.

Numérologie flexible et forme d'onde

Alors que **LTE** utilise principalement un espacement de 15 kHz, **NR** définit une famille de numérolgies :

$$\Delta f_\mu = 15 \times 2^\mu \text{ kHz} \quad (2.58)$$

Les espacements courants sont notamment 15, 30, 60, 120 et 240 kHz. Lorsque Δf augmente, la durée utile du symbole diminue approximativement selon :

$$T_u = \frac{1}{\Delta f_\mu} \quad (2.59)$$

Une numérolgie faible fournit des symboles longs et convient aux grandes cellules ou aux canaux présentant un étalement temporel important. Une numérolgie élevée réduit la durée

des symboles et des *slots*, ce qui convient mieux aux fréquences élevées, à la forte mobilité et aux transmissions à faible latence [66, 67, 68].

NR utilise le CP-OFDM en liaison descendante et peut employer le CP-OFDM ou le DFT-s-OFDM en liaison montante. Il conserve donc les principes mathématiques de LTE mais permet d'adapter la grille aux conditions radio. Des transmissions plus courtes qu'un *slot* complet, souvent appelées *mini-slots*, peuvent commencer plus rapidement. La latence totale reste cependant la somme de plusieurs composantes :

$$T_{\text{E2E}} = T_{\text{attente}} + T_{\text{planification}} + T_{\text{transmission}} + T_{\text{traitement}} + T_{\text{transport}} \quad (2.60)$$

La réduction de la durée radio ne garantit donc pas à elle seule une faible latence de bout en bout.

Codage et adaptation de la transmission

La 5G remplace les turbo-codes LTE par des codes LDPC pour les principaux canaux de données. De manière générale, un code LDPC est un code linéaire pouvant être décrit à l'aide d'une matrice de contrôle de parité creuse $\mathbf{H}$. Par définition, un mot de code valide $\mathbf{c}$ satisfait :

$$\mathbf{H}\mathbf{c}^T = \mathbf{0} \quad \text{dans GF}(2) \quad (2.61)$$

Cette relation constitue une propriété générale des codes linéaires et permet de vérifier qu'un mot appartient au code considéré. Dans le cas de la 5G NR, les structures de codes LDPC et les opérations de codage associées sont définies par la spécification 3GPP TS 38.212 [69]. Les informations de contrôle utilisent, quant à elles, principalement des codes polaires, mieux adaptés aux blocs courts [69, 68].

Comme en LTE, le gNodeB adapte la modulation, le rendement du code et le nombre de couches spatiales aux conditions radio. Le débit effectivement disponible pour les données utiles reste inférieur au débit physique nominal, puisqu'une partie des ressources est consacrée aux signaux de référence et de contrôle et que les erreurs de transmission peuvent entraîner des retransmissions. Le MCS optimal est donc celui qui maximise le débit effectivement livré, et non nécessairement celui qui présente le débit physique nominal le plus élevé.

Massive MIMO et formation de faisceau

La 5G utilise fréquemment des réseaux comportant un grand nombre d'éléments d'antenne. Pour un utilisateur dont le canal est représenté par le vecteur $\mathbf{h}$ et un vecteur de précodage $\mathbf{w}$, le signal reçu s'écrit :

$$y = \mathbf{h}^H \mathbf{w} s + n \quad (2.62)$$

Le gain utile est proportionnel à :

$$G_{\text{BF}} = |\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2 \quad (2.63)$$

Lorsque le canal est connu, le précodage à rapport maximal choisit idéalement un vecteur orienté selon $\mathbf{h}$. Pour N éléments cohérents, le gain de réseau peut être de l'ordre de :

$$G_{\text{array}}[\text{dB}] \approx 10 \log_{10}(N) \quad (2.64)$$

La formation de faisceau concentre ainsi l'énergie dans la direction du terminal et compense une partie des pertes observées dans les bandes élevées. Le massive **MIMO** permet également de former plusieurs faisceaux et de desservir simultanément plusieurs utilisateurs. Le gain réel dépend toutefois de l'estimation du canal, de la corrélation entre les antennes et des interférences.

Dans les bandes millimétriques, le gNodeB transmet les signaux de synchronisation dans plusieurs directions successives. Le terminal sélectionne le meilleur faisceau avant l'établissement de la liaison. Cette directivité améliore la portée, mais rend la communication sensible au blocage par un obstacle ou à un changement rapide d'orientation.

2.4.4 Comparaison entre **LTE** et 5G **NR**

Paramètre	LTE / LTE-Advanced	5G NR
Réseau d'accès	E-UTRAN et eNodeB	NG-RAN et gNodeB
Cœur de réseau	EPC : MME , S-GW , P-GW et HSS	5GC : AMF , SMF , UPF , UDM et autres fonctions de service
Forme d'onde descendante	OFDMA	CP-OFDM
Forme d'onde montante	SC-FDMA	CP-OFDM ou DFT-s-OFDM
Espacement des sous-porteuses	Principalement 15 kHz	$15 \times 2^\mu$ kHz
Codage des données	Turbo-codes	LDPC
Codage du contrôle	Codes convolutifs et codes de blocs selon le canal	Principalement codes polaires
Antennes	MIMO et formation de faisceau	Massive MIMO et faisceaux fortement directionnels
Gestion des services	EPS bearers et QCI	Sessions PDU , QoS flows, 5QI et network slicing
Objectifs principaux	Haut débit mobile et services IP	eMBB , URLLC et mMTC

TABLE 2.5 – Comparaison générale entre **LTE** et 5G **NR** [59, 70, 60, 66, 71].

2.4.5 Intérêt dans le cadre de ce mémoire

LTE et 5G ne constituent pas normalement un réseau local autonome entre smartphones. Leur fonctionnement dépend d'une station de base d'opérateur, d'un abonnement et d'une couverture disponible. Ils peuvent cependant fournir une liaison de collecte vers Internet à un smartphone utilisé comme passerelle de bordure. Leurs principaux avantages sont l'infrastructure déjà déployée, la mobilité et le transport natif des paquets **IP**. Leurs limites sont la dépendance envers l'opérateur, le coût de l'abonnement, la variabilité de la couverture et la consommation du modem.

Les bandes **LTE** basses sont généralement mieux adaptées à la couverture forestière que les bandes 5G moyennes ou millimétriques. Une liaison 5G peut offrir une capacité supérieure mais exige souvent un **SINR** plus élevé et une cellule plus proche. La qualité de la liaison radio peut notamment être caractérisée à l'aide d'indicateurs tels que le **RSRP**, le **RSRQ** et le **SINR** [72]. Dans le cadre d'une évaluation expérimentale, ces grandeurs peuvent être complétées par des mesures de débit utile, de latence et de consommation énergétique afin de caractériser plus largement les performances de la connexion pour l'application considérée.

LTE et **NR** définissent également des mécanismes de communication directe appelés *sidelink*. Leur présence dans la norme ne signifie toutefois pas qu'une application Android puisse les configurer librement : leur accès dépend du modem, du firmware, de l'opérateur et des **API** du

constructeur. Pour des smartphones réutilisés, Bluetooth ou Wi-Fi restent donc généralement plus accessibles pour la liaison locale, tandis que **LTE** ou 5G sont surtout pertinents comme liaison de retour vers le réseau public.

En conclusion, **LTE** et 5G reposent sur une allocation centralisée des ressources et sur des techniques communes de traitement du signal : **OFDM**, modulation **QAM**, codage correcteur, adaptation au **SINR**, **MIMO** et retransmissions **HARQ**. **LTE** utilise une grille radio relativement fixe, l'**OFDMA** en descente et le **SC-FDMA** en montée. La 5G **NR** généralise cette architecture grâce à une numérologie flexible, aux codes **LDPC** et polaires, au massive **MIMO** et à un cœur de réseau orienté services. Ces évolutions augmentent la capacité et la flexibilité, sans supprimer les contraintes fondamentales du bilan de liaison, des interférences, de la consommation et de la disponibilité de l'infrastructure.

2.5 Technologies hybrides

Les technologies présentées précédemment sont généralement étudiées comme des systèmes radio indépendants. Il est néanmoins possible de concevoir des mécanismes de **Cross-Technology Communication (CTC)** dans lesquels le matériel prévu pour une technologie reproduit une forme d'onde compréhensible par une autre. Ces approches ne visent pas nécessairement à remplacer les protocoles existants, mais à créer une interopérabilité ponctuelle ou à réutiliser un matériel radio déjà disponible.

2.5.1 Communication hybride BLE-LoRa : le système BoRa

Les technologies hybrides cherchent à combiner les avantages de plusieurs interfaces radio ou à permettre à des équipements utilisant des protocoles différents de communiquer directement. Dans ce contexte, BoRa, pour *LoRa over BLE*, propose une forme expérimentale de communication CTC entre des circuits **BLE** et **LoRa** disponibles dans le commerce. Il ne s'agit pas simplement d'intégrer une radio **BLE** et une radio **LoRa** dans un même équipement : BoRa modifie le fonctionnement de la couche physique d'un émetteur **BLE**, afin qu'il génère un signal pouvant être interprété comme un signal **LoRa**, c'est-à-dire avec une forme d'onde proche de la modulation CSS. Le système concerne plus précisément **LoRa** à 2.4 GHz, qui partage une bande de fréquences compatible avec les circuits **BLE** [73].

La Figure 2.3 présente les trois chaînes de traitement prévues par BoRa : l'émission d'un signal **LoRa** émulé par un circuit **BLE**, sa réception par un circuit **LoRa** et sa réception par un autre circuit BLE.

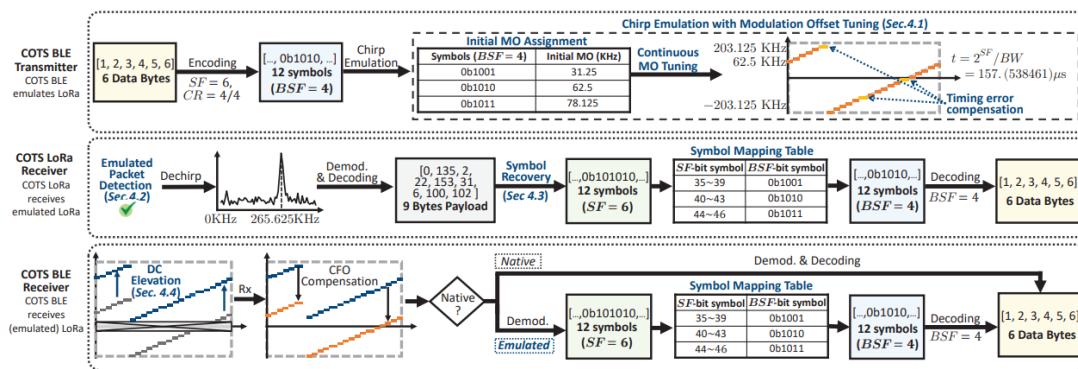


FIGURE 2.3 – Architecture générale du système BoRa [73].

Dans la première chaîne, un circuit **BLE** joue le rôle d'émetteur **LoRa** émulé. Les octets

applicatifs sont d'abord encodés selon les opérations de codage de **LoRa** présentées dans la section précédente. Ils sont ensuite convertis en symboles de BSF bits, où BSF représente le nombre de bits pouvant être portés par chaque chirp émulé. Cette adaptation est nécessaire car le réglage fréquentiel d'un circuit **BLE** est moins fin que celui d'un émetteur **LoRa** natif. Si f_g est la granularité du réglage fréquentiel et BW la bande passante du chirp, le nombre de valeurs disponibles est :

$$n_c = \left\lfloor \frac{BW}{f_g} \right\rfloor \quad (2.65)$$

et le nombre maximal de bits porté par un chirp BoRa vaut :

$$BSF_{\max} = \lfloor \log_2(n_c) \rfloor \quad (2.66)$$

Dans l'exemple de la Figure 2.3, une bande de 406.25 kHz et une granularité de 15.625 kHz fournissent 26 valeurs fréquentielles, ce qui conduit à $BSF = 4$, alors que le récepteur **LoRa** utilise $SF = 6$.

L'émulation du chirp repose sur le réglage dynamique du **Modulation Offset (MO)**. Dans un circuit **BLE** conventionnel, ce paramètre sert à compenser l'écart de fréquence porteuse entre l'émetteur et le récepteur. BoRa détourne cette fonction : le circuit transmet continuellement des bits identiques afin de produire un signal de fréquence presque constante, puis modifie successivement le **MO** pour faire évoluer la fréquence au cours du temps. Il reproduit ainsi, par paliers, le balayage fréquentiel d'un chirp **LoRa**. Une valeur initiale de **MO** est associée à chaque symbole, tandis qu'une compensation temporelle corrige les erreurs cumulées dues à la précision limitée du temporisateur.

Dans la deuxième chaîne, un récepteur **LoRa** commercial reçoit les chirps émulés et les démodule comme des symboles **LoRa** natifs de SF bits. Les imperfections fréquentielles peuvent toutefois conduire plusieurs symboles **LoRa** voisins à représenter le même symbole BoRa. Une table de correspondance associe donc chaque résultat de démodulation au symbole de BSF bits dont le décalage fréquentiel est le plus proche.

Deux difficultés supplémentaires doivent être résolues. Premièrement, le circuit **LoRa** vérifie strictement le mot de synchronisation et peut rejeter un paquet dont les chirps ne sont pas suffisamment précis. BoRa adapte donc la détection afin d'augmenter la tolérance aux erreurs de symbole. Deuxièmement, les symboles obtenus après démodulation ne sont normalement pas accessibles à l'application. BoRa les reconstruit logiciellement en inversant les opérations réversibles de la chaîne de décodage **LoRa** puis applique la table de correspondance avant de décoder la charge utile.

La troisième chaîne permet à un circuit **BLE** de recevoir un signal **LoRa** natif ou émulé. BoRa exploite les échantillons complexes I/Q fournis par certaines fonctions de radiogoniométrie (en anglais, *direction finding*) puis réalise le déchirpage et la **FFT** décrits dans la section consacrée à **LoRa**. Le frontal analogique **BLE** déforme toutefois l'énergie située autour de la fréquence nulle. BoRa introduit volontairement un décalage de fréquence porteuse afin de déplacer le chirp hors de cette zone. Cette technique, appelée *DC elevation*, est ensuite compensée numériquement avant le décodage.

BoRa permet ainsi une communication bidirectionnelle entre du matériel **BLE** et du matériel **LoRa**, ainsi qu'une liaison longue portée entre deux circuits **BLE** utilisant tous deux le système. Les auteurs rapportent jusqu'à 1500 m entre un émetteur **BLE** et un récepteur **LoRa**, et jusqu'à 1100 m entre deux circuits **BLE**, avec un débit d'environ 10 kb/s en visibilité directe extérieure [73].

BoRa reste néanmoins un prototype de recherche. L'implémentation présentée repose notamment sur un circuit **BLE** TI CC2400 intégré à une plateforme Ubertooth One et sur un transceiver **LoRa** SX1280. La génération des chirps nécessite un contrôle bas niveau du circuit **BLE** afin de modifier dynamiquement les registres associés au Modulation Offset. Du côté de la réception **BLE**, l'implémentation expérimentale accède directement aux signaux I/Q du frontal radio et utilise des composants externes pour leur échantillonnage et leur traitement. Ces fonctionnalités ne correspondent pas aux interfaces radio habituellement exposées à une application Android. Les travaux présentés démontrent donc la faisabilité physique d'une communication **LoRa** over **BLE** sur du matériel **BLE** commercial, mais ne démontrent pas son déploiement direct sur un smartphone conventionnel.

2.5.2 Communication hybride Wi-Fi-LoRa : les systèmes Wi-Lo et WiRa

À l'image de BoRa, Wi-Lo et WiRa relèvent de la *cross-technology communication* : un émetteur Wi-Fi est programmé afin de produire une forme d'onde décodable par un récepteur **LoRa** commercial. Il ne s'agit donc ni d'encapsuler un paquet **LoRa** dans une trame Wi-Fi, ni d'utiliser une passerelle munie de deux radios. Le contenu de la trame Wi-Fi est choisi pour que le signal émis ressemble à une modulation **CSS**. Cette approche concerne **LoRa** à 2.4 GHz, compatible avec la bande Wi-Fi, et non les transmissions **LoRa** EU868 décrites précédemment.

Wi-Lo exploite la modulation **CCK** de l'**IEEE** 802.11b à 11 Mbit/s. Son architecture, représentée à la Figure 2.4, transforme par logiciel un point d'accès Wi-Fi en émetteur **LoRa** descendant [74]. Le signal **LoRa** recherché est généré numériquement à 11 MHz, puis découpé en segments de durée :

$$\Delta t = \frac{8}{11} \mu s \quad (2.67)$$

correspondant aux huit chips d'un symbole **CCK**. Pour chaque segment complexe s , l'algorithme sélectionne la séquence **CCK** dont la forme d'onde est la plus proche :

$$\tilde{c} = \arg \max_{c \in \mathcal{C}_{\text{CCK}}} [\Re(s)\Re(c) + \Im(s)\Im(c)] \quad (2.68)$$

Ces symboles sont ensuite convertis en bits de charge utile Wi-Fi. La transmission de la trame produit ainsi une approximation du chirp **LoRa**. La Figure 2.5 compare les spectres natif et émulé : la composante **LoRa** est reconstruite, mais des composantes parasites apparaissent hors de sa bande utile.

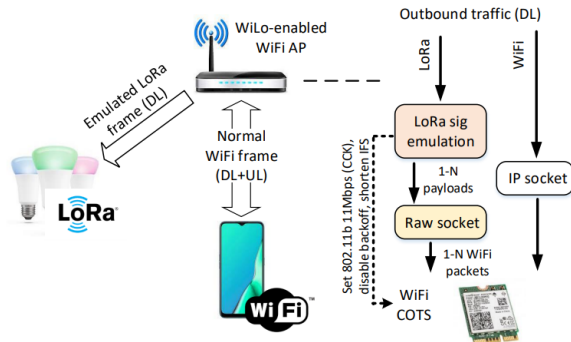


FIGURE 2.4 – Architecture du projet Wi-Lo [74]

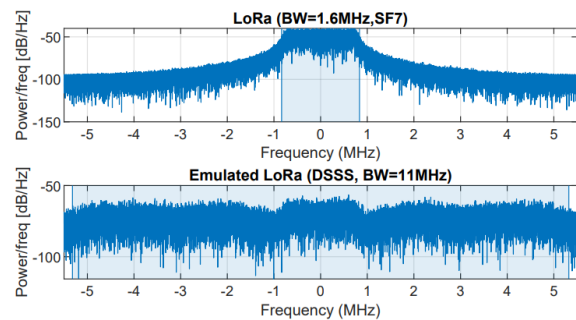


FIGURE 2.5 – Comparaison entre le **LoRa** classique et le **LoRa** émulé (Wi-Lo) [74]

Le temps d'air d'un paquet **LoRa** dépasse souvent la durée maximale d'une trame **IEEE**

802.11b. Wi-Lo répartit alors l'émulation sur plusieurs trames successives. Les préambules Wi-Fi et les intervalles entre trames interrompent le chirp. Les auteurs réduisent ces interruptions en désactivant le *backoff* et en raccourcissant l'intervalle inter-trame. Un paquet LoRa de 813 ms a ainsi été reproduit avec 283 trames Wi-Fi, pour une dégradation de SNR d'environ 0.7 dB. Dans un essai extérieur, le récepteur LoRa reçoit Wi-Lo jusqu'à 300 m, contre 60 m pour un récepteur Wi-Fi ordinaire.

Wi-Lo mobilise toutefois l'ensemble du canal Wi-Fi pour reproduire un signal LoRa beaucoup plus étroit et plus lent. WiRa améliore l'efficacité spectrale grâce à l'OFDMA de l'IEEE 802.11ax [75]. La Figure 2.6 montre que seule une petite Resource Units est consacrée à l'émulation, tandis que les autres RU restent disponibles pour les utilisateurs Wi-Fi.

La forme d'onde LoRa est approchée par une séquence de symboles QAM sur les sous-porteuses de cette RU. Chaque sous-porteuse occupant 78.125 kHz, le nombre minimal couvrant une largeur LoRa BW vaut :

$$s = \left\lceil \frac{BW}{78.125 \text{ kHz}} \right\rceil \quad (2.69)$$

La largeur seule ne suffit cependant pas. À cause du codage convolutif et de l'entrelacement Wi-Fi, le système reliant les bits sources aux symboles QAM doit être inversible. Pour un rendement de code c , WiRa sélectionne donc une RU comportant au moins $m \geq s/c$ sous-porteuses de données.

WiRa utilise l'agrégation de trames pour atteindre la durée d'un paquet LoRa complet. Les en-têtes des sous-trames créent néanmoins des symboles invalides. Le système leur associe un motif reconnaissable que le récepteur retire lors de la reconstruction. Le préfixe cyclique OFDM provoque une seconde distorsion en interrompant périodiquement le chirp. WiRa applique alors un mécanisme de *mode flipping* qui alterne des configurations dont les erreurs se compensent partiellement. La Figure 2.7 résume l'ensemble de la chaîne : sélection de la RU, émulation, agrégation, identification des motifs et reconstruction.

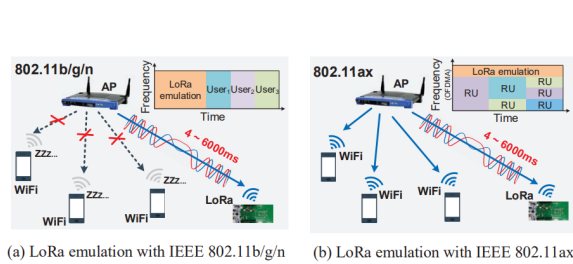


FIGURE 2.6 – Émulation LoRa avec différents protocoles Wi-Fi [75]

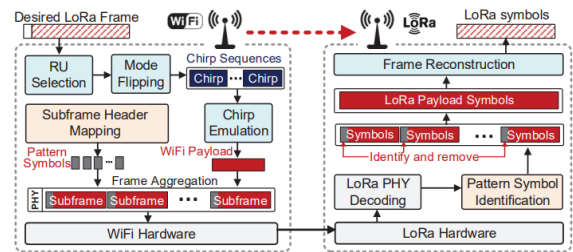


FIGURE 2.7 – Architecture du projet WiRa [75]

Le prototype WiRa repose sur une plateforme USRP et un récepteur LoRa SX1280, et non sur un point d'accès commercial non modifié. Les auteurs obtiennent jusqu'à 40.037 kbit/s avec un taux d'erreur symbole inférieur à 0.1 ; à 300 m en extérieur, les performances restent proches de celles d'un émetteur LoRa natif. Wi-Lo et WiRa démontrent donc la faisabilité d'une liaison descendante Wi-Fi vers LoRa à 2.4 GHz, mais nécessitent un contrôle bas niveau de la couche physique et ne sont pas directement transposables aux interfaces Wi-Fi ordinaires des smartphones.

2.6 Comparaison et choix de technologie

Les technologies étudiées précédemment présentent chacune des avantages en matière de portée, de débit ou de consommation. Leur comparaison doit cependant être réalisée au regard de l'objectif spécifique de ce travail : utiliser des smartphones reconditionnés comme nœuds relais d'un réseau maillé en exploitant autant que possible les interfaces radio déjà présentes dans les appareils. Les principaux critères retenus sont donc la disponibilité native de la technologie sur smartphone, la possibilité d'établir une communication directe sans infrastructure extérieure, son accessibilité depuis Android, sa portée et sa consommation. Les valeurs reprises dans les tables 2.6 à 2.9 doivent à ce titre être considérées comme des ordres de grandeur, les performances réelles dépendant fortement du matériel et de l'environnement.

LoRa et LoRaWAN présentent des caractéristiques particulièrement intéressantes pour un réseau forestier, notamment grâce à leur fonctionnement dans des bandes sub-GHz et à leur grande sensibilité, permettant des communications sur plusieurs kilomètres avec une faible consommation. Il s'agit d'ailleurs de la technologie actuellement utilisée par Silvanet. Leur principal inconvénient dans le cadre de ce travail est cependant matériel : les smartphones conventionnels ne disposent pas d'une interface LoRa native. Leur utilisation nécessiterait donc l'ajout d'un *transceiver* externe et d'une interface permettant de le piloter, ce qui s'éloigne de l'objectif de réutilisation directe des capacités existantes des smartphones. LoRaWAN n'est donc pas retenu comme technologie de communication entre les smartphones, même s'il reste nécessaire pour assurer la compatibilité avec les Wildfire Sensors existants.

Wi-Fi HaLow constitue également une solution particulièrement adaptée aux applications IoT longue portée. Son fonctionnement dans les bandes sub-GHz offre une propagation plus favorable que celle du Wi-Fi conventionnel et des communications proches du kilomètre ont été démontrées expérimentalement. Il souffre toutefois de la même limitation fondamentale que LoRa dans le cadre de ce travail : la radio IEEE 802.11ah n'est généralement pas intégrée aux smartphones conventionnels. Son utilisation nécessiterait donc un module matériel supplémentaire. Malgré ses bonnes performances théoriques pour un déploiement forestier, Wi-Fi HaLow est dès lors écarté pour la communication native entre smartphones.

LTE et 5G présentent au contraire l'avantage d'être largement intégrés aux smartphones et de permettre des communications à longue distance. Leur fonctionnement normal repose cependant sur une infrastructure opérateur comportant notamment une station de base, une couverture disponible et généralement un abonnement. Ils ne permettent donc pas de constituer simplement un réseau local autonome entre smartphones déployés en forêt. Des mécanismes de communication directe tels que le *sidelink* existent dans les normes cellulaires, mais ils ne sont pas librement accessibles depuis les API Android conventionnelles et dépendent fortement du modem, du *firmware* et de l'opérateur. LTE et 5G sont donc plus pertinents pour assurer une éventuelle liaison de retour vers Internet que pour constituer le réseau maillé local étudié.

Le Wi-Fi conventionnel répond à davantage de contraintes : il est disponible nativement sur smartphone, bénéficie d'API Android matures et permet des communications directes entre terminaux. Son débit très élevé représente toutefois un avantage relativement faible pour l'application considérée, puisque les données à transmettre sont essentiellement constituées de messages courts provenant de capteurs environnementaux. En contrepartie, son maintien en activité implique généralement une consommation plus élevée que celle du Bluetooth Low Energy, tandis que son fonctionnement dans les bandes 2,4, 5 ou 6 GHz ne lui procure pas d'avantage particulier en matière de propagation dans la végétation. Le Wi-Fi reste donc techniquement envisageable, mais son compromis entre débit, consommation et portée paraît moins adapté aux besoins du réseau étudié.

Bluetooth Low Energy constitue finalement le candidat retenu. Il est intégré nativement aux

smartphones, permet une communication directe sans infrastructure extérieure et dispose d'API Android accessibles. Sa conception est également adaptée à des échanges courts et intermittents, ce qui correspond au faible volume de données à transporter. Sa principale faiblesse reste sa portée relativement limitée, notamment en raison de son fonctionnement à 2,4 GHz. C'est précisément sur ce point que BLE 5 Coded PHY présente un intérêt : grâce à l'ajout de redondance et de codage correcteur d'erreurs, les modes S=2 et surtout S=8 améliorent la sensibilité de réception et permettent théoriquement d'étendre significativement la portée sans ajouter de matériel radio au smartphone. BLE 5 Coded PHY est donc retenu comme le meilleur compromis parmi les technologies étudiées. Ce choix ne garantit toutefois pas que sa portée soit suffisante pour remplacer les Mesh Gateways de DRYAD en milieu forestier ; cette question constitue précisément l'objet de la caractérisation expérimentale menée au chapitre suivant.

Critère	LoRaWAN	Bluetooth Classic	BLE	BLE 5 Coded PHY
Disponibilité native sur smartphone	Non	Oui, quasi universelle	Oui, quasi universelle	Partielle : fonction optionnelle dépendant du chipset
Portée indicative : annoncée ou théorique / expérimentale	Plusieurs kilomètres ; souvent 2 à 15 km en milieu rural. En forêt : environ 0,25 à 3 km selon la végétation	Environ 10 à 100 m ; souvent 10 à 40 m entre smartphones	Environ 10 à 100 m ; plus de 100 m possible en visibilité directe	Jusqu'à environ 4 fois la portée du LE 1M ; environ 780 m mesurés en LOS avec des cartes radio
Consommation énergétique	Très faible pour l'end device	Moyenne ; élevée pour un flux continu	Très faible pour des échanges courts et espacés	Faible à moyenne ; temps d'air supérieur au BLE non codé
Communication directe sans infrastructure	Non en LoRaWAN standard : une passerelle et un serveur sont requis	Oui, liaison point à point	Oui, en mode connecté ou par advertising	Oui, si les deux équipements supportent cette PHY
Possibilité de communication multi-saut	Non dans LoRaWAN standard ; solutions propriétaires ou expérimentales	Non nativement sur Android	Possible via Bluetooth Mesh ou un routage applicatif	Possible au niveau applicatif ; la PHY codée ne fournit pas elle-même de routage

TABLE 2.6 – Comparaison multicritère de LoRaWAN et des principales variantes de Bluetooth : disponibilité, portée, consommation et possibilités de communication directe ou multi-saut.

Critère	Wi-Fi	Wi-Fi HaLow	LTE	5G
Disponibilité native sur smartphone	Oui, universelle	Non sur les smartphones grand public ; quelques terminaux spécialisés	Oui, quasi universelle	Oui sur les smartphones récents, mais pas universelle
Portée indicative : annoncée ou théorique / expérimentale	Quelques dizaines de mètres en intérieur ; environ 50 à 100 m en extérieur	Objectif d'environ 1 km ; environ 0,8 à 1 km mesuré en liaison directe	De quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres selon la bande et la cellule	De quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres selon la fréquence et la cellule
Consommation énergétique	Élevée, particulièrement lors du maintien d'une connexion active	Faible à moyenne ; optimisée pour IoT	Élevée lorsque le modem est actif	Élevée à très élevée ; généralement supérieure au LTE
Communication directe sans infrastructure	Oui via Wi-Fi Direct ou Wi-Fi Aware ; sinon point d'accès requis	Partielle : réseau local possible, mais généralement organisé autour d'un point d'accès	Non pour l'usage mobile ordinaire ; possible via des modes sidelink spécialisés	Non pour l'usage mobile ordinaire ; possible via 5G NR sidelink
Possibilité de communication multi-saut	Possible via IEEE 802.11s ou relais applicatifs ; pas de mesh transparent sur Android standard	Possible avec certains relais ou produits mesh ; support variable	Relais ou sidelink dans des déploiements spécialisés	Relais et sidelink techniquement possibles ; non accessibles aux applications ordinaires

TABLE 2.7 – Comparaison multicritère du Wi-Fi, de Wi-Fi HaLow, du LTE et de la 5G : disponibilité, portée, consommation et possibilités de communication directe ou multi-saut.

Critère	LoRaWAN	Bluetooth Classic	BLE	BLE 5 Coded PHY
Compatibilité Android	Aucune pile native ; module externe et SDK constructeur nécessaires	Excellente ; API RFCOMM et profils Bluetooth	Excellente ; API GATT scanning et advertising	Bonne si supportée ; API depuis Android 8, mais vérification matérielle obligatoire
Débit physique ou ordre de grandeur	Environ 0.3 à 50 kb/s	De 1 à 3 Mb/s	1 ou 2 Mb/s ; débit applicatif inférieur	125 ou 500 kb/s ; débit applicatif nettement inférieur
Bandes de fréquences principales	Bandes sub-GHz ; EU863-870 en Europe	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Résistance relative à la végétation	Bonne grâce aux fréquences sub-GHz et à la sensibilité élevée	Faible à moyenne ; atténuation importante à 2.4 GHz	Faible à moyenne ; sensible à la végétation et à l'humidité	Moyenne : meilleur budget de liaison, mais même atténuation à 2.4 GHz
Besoin de matériel externe sur smartphone	Oui : transceiver ou module LoRa	Non	Non	Non si le chipset du smartphone la supporte
Maturité technologique et disponibilité des API	Protocole très mature ; écosystème IoT développé ; pas d'API Android native	Très mature ; API Android stables et largement documentées	Très mature ; API Android stables ; fort écosystème	Norme mature mais support matériel optionnel ; comportement dépendant du constructeur

TABLE 2.8 – Comparaison multicritère de LoRaWAN et des principales variantes de Bluetooth : compatibilité Android, débit, fréquences, propagation, matériel et maturité des API

Critère	Wi-Fi	Wi-Fi HaLow	LTE	5G
Compatibilité Android	Excellente ; Wi-Fi, Wi-Fi Direct et Wi-Fi Aware selon le matériel	Faible sur smartphone ; intégration spécifique ou interface externe nécessaire	Excellente pour le transport IP ; contrôle radio limité	Bonne pour le transport IP et les mesures réseau ; fonctions avancées limitées
Débit physique ou ordre de grandeur	De quelques dizaines de Mb/s à plusieurs Gb/s	Environ 150 kb/s à plusieurs dizaines de Mb/s	De quelques dizaines à plusieurs centaines de Mb/s ; jusqu'à environ 1 Gb/s en LTE-Advanced	De quelques dizaines de Mb/s à plus de 1 Gb/s en pratique ; débits de crête supérieurs
Bandes de fréquences principales	2.4, 5 et 6 GHz	Bandes sans licence sous 1 GHz ; environ 868 MHz en Europe	Bandes licenciées ; principalement de quelques centaines de mégahertz à quelques gigahertz	Bandes licenciées allant des fréquences sub-GHz à des fréquences supérieures à 24 GHz
Résistance relative à la végétation	Moyenne à 2.4 GHz ; faible à 5 et 6 GHz	Bonne grâce aux fréquences sub-GHz	Bonne dans les bandes basses ; plus faible dans les bandes élevées	Très variable : bonne en bande basse, faible aux fréquences élevées
Besoin de matériel externe sur smartphone	Non	Oui sur un smartphone conventionnel	Non, mais une carte SIM ou eSIM et un réseau opérateur sont requis	Non si le modem est compatible ; réseau et abonnement requis
Maturité technologique et disponibilité des API	Très mature ; API Android complètes ; communication multi-saut peu accessible	Norme mature, mais écosystème mobile et API Android encore limités	Très mature pour les données IP ; accès aux paramètres radio de bas niveau limité	Mature pour l'accès IP ; API de détection disponibles ; <i>sidelink</i> non exposé aux applications ordinaires

TABLE 2.9 – Comparaison multicritère du Wi-Fi, de Wi-Fi HaLow, du LTE et de la 5G : compatibilité Android, débit, fréquences, propagation, matériel et maturité des API

Chapitre 3

Modélisation et caractérisation expérimentale d'une liaison **BLE** Coded PHY

3.1 Bilan de liaison

Dans cette partie, le bilan de liaison d'une connexion **BLE** entre deux smartphones Google Pixel 6 est établi pour un milieu forestier.

Le bilan de liaison (*link budget* en anglais) constitue un outil fondamental permettant d'évaluer les performances d'un système de communication radio. Il consiste à comptabiliser l'ensemble des gains et des pertes de puissance subis par un signal de communication entre l'émetteur et le récepteur. Son rôle est d'estimer la puissance effectivement reçue par le récepteur. Le rapport signal à bruit (le **Signal-to-Noise Ratio (SNR)**) ou le débit de transmission sont conditionnés par cette puissance reçue, d'où l'importance de la calculer correctement.

Dans sa forme la plus générale, l'équation du bilan de liaison est présentée en décibels ci-après :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL_{tot} - L_{add} \quad (3.1)$$

$$PL_{tot} = PL_{ref} + L_{veg} \quad (3.2)$$

Variable	Unité	Définition
P_r	dBm	Puissance reçue
P_t	dBm	Puissance transmise
G_t	dBi	Gain de transmission
G_r	dBi	Gain de réception
PL	dB	Perte de propagation (<i>path loss</i> en anglais)
L_{veg}	dB	Pertes associées à la végétation, c'est-à-dire l'absorption, la diffusion et l'ombrage introduits par les troncs, branches, feuilles et l'humidité du milieu forestier
L_{add}	dB	Pertes supplémentaires qui ne sont pas directement associées à la propagation dans le milieu, telles que les pertes dues au désalignement ou à la polarisation des antennes

TABLE 3.1 – Définition des variables de l'équation **3.1**

Cette équation traduit simplement le fait que la puissance reçue correspond à la puissance injectée dans le canal, augmentée des gains apportés par les antennes mais diminuée de l'ensemble des pertes rencontrées lors de la propagation.

Explications des grandeurs

Pour les calculs suivants, sauf indication contraire, l'unité utilisée est le décibel. Le décibel permet deux choses principalement : premièrement, il permet de passer d'une échelle linéaire à une échelle logarithmique, souvent bien plus lisible lorsqu'on travaille en télécommunication, et deuxièmement, il simplifie le calcul en transformant toutes les multiplications en additions.

Dans le monde des décibels, il existe différentes échelles qui permettent d'interpréter les données reçues.

- La définition fondamentale [dB] :

$$P \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1 \text{ [W]}}{P_2 \text{ [W]}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1 \text{ [V]}}{V_2 \text{ [V]}} \right) \quad (3.3)$$

Le décibel étant une fonction d'un rapport n'a aucun sens sans contexte et sans outil de comparaison. Il existe donc des définitions qui mettent en scène directement des échelles de valeurs pour la comparaison de puissance.

- Le décibel-milliwatt définit comme [dBm] :

$$P \text{ [dBm]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P \text{ [W]}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3.4)$$

- Le gain par rapport à l'antenne isotrope [dBi] :

Une antenne isotrope est une source ponctuelle théorique qui rayonne de manière égale dans toutes les directions. Elle n'existe pas dans la réalité, mais c'est une référence utile. Les antennes réelles concentrent la puissance dans certaines directions, et nous mesurons cette concentration sous forme de gain. Un gain plus élevé signifie plus directionnel. Le gain d'une antenne dépend de la direction considérée. Il peut être défini, relativement à une antenne isotrope, par

$$G(\theta, \phi) \text{ [dBi]} = 10 \log_{10} \left(\frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} \right) \quad (3.5)$$

où $U(\theta, \phi)$ représente l'intensité de rayonnement de l'antenne dans la direction (θ, ϕ) et U_{iso} celle d'une antenne isotrope rayonnant la même puissance totale.

Les sous-sections suivantes explorent la manière dont on obtient les différentes données pour établir le bilan de liaison final.

3.1.1 Émission

Les variables étudiées lors de cette section sont P_t et G_t .

La puissance transmise (P_t) est généralement imposée par des réglementations. Pour les systèmes Bluetooth Low Energy, la puissance d'émission varie entre -20 dBm et 20 dBm, soit entre 0.1 et 100 mW [29]. À titre de comparaison, en France, la puissance maximale d'une liaison Wi-Fi fonctionnant à 2.45 GHz est de 100 mW soit 20 dBm et, pour une liaison fonctionnant dans la bande 5 470 - 5 725 MHz, la limite est à 1 W de puissance soit 30 dBm [76]. On constate que la

limitation du Wi-Fi 2.4 GHz est la même que la limite du **BLE** car celle-ci dépend en fait de la bande utilisée et non du protocole.

Le gain d'antenne transmettrice (G_t) caractérise la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie rayonnée dans certaines directions de l'espace. Il est généralement exprimé en dBi, c'est-à-dire relativement à une antenne isotrope idéale.

Dans le cas d'antennes omnidirectionnelles, le gain est souvent compris entre 0 et 3 dBi. Pour des antennes directionnelles, ces valeurs croissent et des valeurs supérieures à 10 dBi peuvent être observées (le gain d'une antenne parabolique d'un mètre de diamètre à 5 GHz est environ de 35 dBi [77]).

Les gains sont habituellement fournis par le constructeur sous forme de diagrammes de rayonnement ou de fiche technique. Lorsque ces informations ne sont pas disponibles, il faut alors établir expérimentalement le diagramme de rayonnement de l'antenne et en déduire son gain maximal. Une mesure absolue exigerait une configuration calibrée en chambre anéchoïque. Les expériences menées dans la section 3.3 fournissent seulement une dépendance angulaire relative de la liaison.

3.1.2 Propagation

Les variables étudiées lors de cette section sont PL et L_{veg} .

Le terme PL (pour Path Loss en anglais) représente l'atténuation du signal lors de sa propagation entre l'émetteur et le récepteur. Il constitue généralement la contribution dominante du bilan de liaison.

Il existe différents modèles permettant de calculer cette grandeur.

Dans l'espace libre, les pertes de propagation sont décrites par l'équation de Friis :

$$PL \text{ [dB]} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (3.6)$$

où

- d représente la distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur ;
- f , la fréquence en hertz ;
- c , la vitesse de la lumière.

Cette équation montre que les pertes augmentent à la fois avec la distance et avec la fréquence utilisée.

Le modèle de Friis en espace libre se limite à des lignes de visée totalement dégagées. Pour étendre le champ d'application du calcul des pertes de propagation, on peut utiliser le modèle log-distance. Grâce au coefficient de propagation qui y est incorporé et à la variable aléatoire utilisée pour représenter l'effet de l'ombrage ("shadowing" en anglais), ce modèle permet de meilleures estimations dans des milieux forestiers par exemple.

$$PL \text{ [dB]} = PL_0 \text{ [dB]} + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi \quad (3.7)$$

où

- PL_0 est la perte de propagation de référence obtenue à l'aide de l'équation de Friis (eq. 3.6) ou via des mesures sur le terrain pour une distance d_0 (en règle générale, d_0 est compris entre 1 et 10 mètres pour une microcellule et d_0 vaut 1 kilomètre pour une grande cellule [78]) ;
- n est l'exposant de perte de propagation qui dépend du type d'environnement ([79] mentionne des exposants entre 3.83 et 5.24) ;

- χ est une variable aléatoire à moyenne nulle et distribuée selon une loi gaussienne, avec un écart-type σ exprimé en dB, utilisée uniquement en présence d'un effet d'ombrage.

Dans un environnement forestier, les arbres, les feuilles, les branches ainsi que l'humidité introduisent des atténuations supplémentaires qui ne sont pas prises en compte par le modèle de Friis ou le modèle log-distance. Il existe une série de modèles dédiés à la caractérisation de la végétation. Les articles [80, 81, 82, 83] en recensent quelques-uns.

Parmi les modèles empiriques proposés, on rencontre le modèle **Modified Exponential Decay (MED)**. Il s'agit en réalité d'une famille de modèles dont la forme de l'équation est :

$$L_{\text{MED}} = X f^Y d^Z \quad (3.8)$$

où f est la fréquence en megahertz (MHz), d la profondeur de la végétation en mètres et X, Y, Z sont les paramètres du modèle. Comme dit précédemment, différents modèles existent selon cette configuration, une liste des plus répandus se trouve dans la table 3.2

Modèle	Equations
ITU-R	$L_{\text{ITU-R}} = 0.2 f^{0.3} d^{0.6}$, avec $d < 400m$ (3.9)
Weissberger	$L_{\text{WEIS}} = \begin{cases} 1.33 f^{0.284} d^{0.588}, & \text{avec } 14m < d \leq 400m \\ 0.45 f^{0.284} d, & \text{avec } 0m < d \leq 14m \end{cases} \quad (3.10) \quad f \text{ est en GHz}$
COST 235	$L_{\text{COST}} = \begin{cases} 26.6 f^{-0.200} d^{0.50}, & \text{pour les arbres sans feuilles} \\ 15.6 f^{-0.009} d^{0.26}, & \text{pour les arbres avec feuilles} \end{cases} \quad (3.11)$
FITU-R	$L_{\text{FITUR}} = \begin{cases} 0.37 f^{0.18} d^{0.59}, & \text{pour les arbres sans feuilles} \\ 0.39 f^{0.39} d^{0.25}, & \text{pour les arbres avec feuilles} \end{cases} \quad (3.12)$

TABLE 3.2 – Différentes variantes du modèle **MED**

D'autres modèles plus complexes sont également présentés dans les articles mentionnés précédemment. C'est le cas du modèle **Maximum Attenuation (MA)**, recommandé par l'union internationale des télécommunications (en anglais **International Telecommunications Union (ITU)**) pour des fréquences allant de 30 MHz à 30 GHz. Ce modèle est défini par :

$$L_{\text{MA}} = A_m \left(1 - e^{-\frac{R}{A_m} d} \right) \quad (3.13)$$

où

- A_m représente l'atténuation maximale que peut produire la végétation (exprimée en dB) ;
- d la profondeur de la végétation (exprimé en m) ;
- R la pente initiale de la courbe d'atténuation (exprimée en dB/m).

Lorsque d tend vers l'infini, L_{AM} va tendre vers A_m . L'**ITU** recommande le modèle suivant pour trouver cette grandeur :

$$A_m = A_L f^\alpha \quad (3.14)$$

D'après [84], les valeurs de α et A_L ont été mesurées dans des plages de fréquences. Les résultats de ces expériences sont représentées dans la table 3.3

Intervalle de fréquences	A_L	α
900 - 1800 MHz	0.18 dB	0.752
900 - 2200 MHz	1.15 dB	0.430
105.9 - 2117.5 MHz	1.37 dB	0.420

TABLE 3.3 – Valeurs de A_L et α pour le calcul de A_m du modèle **MA** selon différentes fréquences

On obtient R en dérivant l'équation **3.13** selon la distance d :

$$\frac{d L_{MA}}{dd} = R e^{-R d/A_m} \quad (3.15)$$

$$\left. \frac{d L_{MA}}{dd} \right|_{d=0} = R \quad (3.16)$$

Expérimentalement, on peut obtenir R en faisant un simple rapport $\frac{\Delta L_{MA}}{\Delta d}$ pour des valeurs de d proche de 0.

Enfin, le modèle **Non-Zero Gradient (NZG)** est proposé pour pallier au problème du gradient final nul du modèle **MA** pour les fréquences supérieures à 5GHz. Ce modèle nécessite l'estimation du gradient initial R_0 ainsi qu'une estimation du gradient final R_∞ de la courbe d'atténuation. Tous deux sont exprimés en dB/m. L'équation de ce modèle est la suivante, où k correspond au décalage d'atténuation final en dB :

$$L_{NZG} = R_\infty d + k \left(1 - e^{-\frac{R_0 - R_\infty}{k} d} \right) \quad (3.17)$$

L'évaluation du R_0 se fait de manière analogue à l'évaluation de R dans le modèle **MA** (éq. **3.16**). Pour R_∞ , on reprend la même logique pour, cette fois-ci, une évaluation de la dérivée en $d \rightarrow \infty$.

Le paramètre k contrôle la transition entre le régime proche et le régime lointain. Si k est grand, alors la transition se fera lentement. Si k est petit, alors la transition sera plus rapide. Pour trouver ce paramètre, il faut effectuer des régressions non linéaires, une fois R_0 et R_∞ trouvés.

Dans **[81]**, une évaluation des paramètres a été faite selon des mesures effectuées à deux fréquences : 11.2 GHz et 20 GHz. Les valeurs pour R_0 , R_∞ et k sont données dans la table **3.4**.

Paramètre	Arbres en feuilles	Arbres sans feuilles
R_0 (dB/m)	19.82	6.25
R_∞ (dB/m)	0.33	0.24
k (dB)	37.87	6.45

TABLE 3.4 – Évaluation des paramètres pour le modèle **NZG** **[81]**

3.1.3 Réception

Les variables étudiées lors de cette section sont L_{add} et P_r .

Pour effectuer le bilan de liaison final et ainsi obtenir une évaluation de la puissance reçue, il nous faut encore déterminer L_{add} . Derrière ce terme, se cachent toutes les pertes additionnelles non directement liées à la propagation dans le milieu. Il peut inclure notamment :

- les pertes de câbles ;

- les pertes dues aux connecteurs ;
- les pertes d'adaptation d'impédance ;
- les pertes liées à la polarisation ;
- les pertes dues aux corps des êtres vivants ; ...

Dans les systèmes modernes intégrés tels que les smartphones, ces pertes sont souvent difficiles à mesurer individuellement et sont généralement regroupées dans une marge globale de quelques décibels.

Une fois ce terme approximé, nous pouvons passer à l'évaluation de P_r en résolvant l'équation du bilan de liaison (eq. 3.1). Après avoir calculé P_r , on peut comparer sa valeur à la sensibilité du récepteur, P_{sens} , afin de vérifier si la communication est réalisable.

$$P_r \geq P_{sens} \quad (3.18)$$

La condition présentée par l'équation précédente permet de déterminer si le récepteur est théoriquement capable de détecter et décoder le signal reçu. Cependant, cette condition seule ne donne pas d'information sur la robustesse de la liaison. En pratique, il est préférable que la puissance reçue soit supérieure à la sensibilité minimale du récepteur avec une certaine marge. On introduit alors la marge de liaison, définie par :

$$M = P_r - P_{sens} \quad (3.19)$$

Lorsque $M > 0$, la puissance reçue est supérieure à la sensibilité minimale du récepteur et la liaison est théoriquement réalisable. À l'inverse, si $M < 0$, la puissance reçue est inférieure au niveau minimal nécessaire au décodage du signal, ce qui rend la communication impossible ou fortement instable.

Cette marge est particulièrement importante dans un environnement forestier. En effet, la puissance reçue n'est pas parfaitement constante. Elle peut varier en fonction de la distance, de l'orientation des smartphones, de la présence d'arbres dans le trajet de propagation, du corps humain, de l'humidité ou encore des phénomènes de fading. Une liaison disposant seulement d'une très faible marge peut donc fonctionner dans certaines conditions mais se dégrader rapidement lorsque le canal varie légèrement.

La marge de liaison constitue donc un indicateur utile pour interpréter les mesures expérimentales. Une marge importante indiquera une liaison robuste, tandis qu'une marge faible permettra d'expliquer une des erreurs et retransmissions au niveau radio, de dégradation de la robustesse et finalement de risque de rupture de la connexion lorsque la distance augmente ou lorsque l'orientation des smartphones devient défavorable.

Comme nous pouvons le voir, le bilan de liaison constitue ainsi la première étape dans le dimensionnement d'un réseau radio avant l'étude plus approfondie du bruit et d'autres performances.

3.2 Bruit et métriques de performance

L'objectif d'un système de communication radio est de transmettre une information entre un émetteur et un récepteur avec une fiabilité suffisante malgré les nombreuses dégradations subies par le signal au cours de sa propagation. Dans un environnement réel tel qu'une forêt, ces dégradations résultent de plusieurs phénomènes physiques, notamment l'atténuation avec la distance, les pertes dues à la végétation, les réflexions, les diffractions, les interférences ainsi que le bruit thermique généré par les composants électroniques.

L'évaluation des performances d'une liaison radio repose donc sur une chaîne de calculs successifs. Dans un premier temps, le bilan de liaison permet d'estimer la puissance du signal reçu. Cette puissance est ensuite comparée à la puissance de bruit afin d'obtenir le rapport signal à bruit (**SNR**).

Contrairement au signal utile, le bruit n'est généralement pas directement mesurable sur un smartphone. Il est donc estimé à partir de modèles physiques. Le bruit présent à l'entrée du récepteur provient principalement de trois contributions :

$$P_n = P_{thermal} + P_{receiver} + P_{interference} \quad (3.20)$$

où :

- $P_{thermal}$ représente le bruit thermique généré par l'agitation des électrons dans les composants électroniques ;
- $P_{receiver}$ correspond au bruit propre du récepteur (amplificateurs, mélangeurs, convertisseurs analogique-numérique, ...) ;
- $P_{interference}$ désigne les perturbations provenant d'autres systèmes radio fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquence.

Dans de nombreux cas, le bruit thermique constitue la limite fondamentale des performances d'un système radio.

Le bruit thermique est décrit par la loi de Johnson-Nyquist.

$$\overline{V_n^2} = 4k_B T R \Delta f \quad (3.21)$$

On obtient de cette loi la puissance moyenne du bruit disponible dans une bande passante B qui vaut alors :

$$P_{thermal} = k_B T B \quad (3.22)$$

où :

- $k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann ;
- T est la température absolue en Kelvin ;
- B est la bande passante en Hertz.

Cette relation montre que le bruit augmente linéairement avec la bande passante utilisée. Plus la bande passante du récepteur est élevée, plus la puissance de bruit thermique intégrée augmente.

À température ambiante ($T = 290 \text{ K}$), la densité spectrale de bruit est approximativement constante :

$$N_0 = kT = 4.0 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} \quad (3.23)$$

ou en unités logarithmiques :

$$N_0 = -173.975 \text{ dBm/Hz} \quad (3.24)$$

Le bruit thermique présenté juste avant constitue une limite physique fondamentale. En pratique, un récepteur radio génère également un bruit additionnel provenant de ses composants électroniques. Cette dégradation est caractérisée par le facteur de bruit (le *Noise Figure*, en anglais) défini comme la dégradation du rapport signal à bruit entre l'entrée et la sortie du récepteur :

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad \leftrightarrow \quad NF_{dB} = SNR_{in,dB} - SNR_{out,dB} \quad (3.25)$$

Le facteur de bruit est généralement exprimé en décibels. Plus sa valeur est faible, plus le récepteur est capable de préserver la qualité du signal reçu.

En tenant compte du facteur de bruit, la puissance totale de bruit devient :

$$P_{n,dB} = -173.975 + 10 \log_{10}(B) + NF_{dB} \quad (3.26)$$

Les interférences ne sont pas modélisées faute de mesure disponible. $P_{n,dB}$ est une estimation du bruit thermique équivalent du récepteur.

Dans le cas des smartphones, le facteur de bruit des récepteurs Bluetooth et Wi-Fi n'est généralement pas publié par les fabricants de chipsets. Il est donc difficile d'estimer précisément la puissance totale de bruit. Dans le cadre de ce mémoire, le facteur de bruit sera uniquement utilisé lors de l'analyse théorique des performances et ne pourra pas être mesuré expérimentalement.

La littérature montre une convergence vers des Noise Figures compris entre 4 et 8 dB pour les technologies BLE (voir table 3.5).

Référence	Technologie	Noise Figure
Jin et al., 2021 [85]	Circuit d'entrée de récepteur à très faible puissance et à faible bruit destiné à une application BLE avec utilisation d'un amplificateur à transconductance à faible bruit (LNTA)	4.8 dB
Shao et al., 2022 [86]	Récepteur BLE à très faible consommation doté d'une plage dynamique sans parasites (SFDR)	6.1 dB
Jin et al., 2022 [87]	Front-end de récepteur en mode tension pour les fréquences intermédiaires basses, destiné aux applications BLE	6.8 dB
Nasrollahpour et al., 2017 [88]	Récepteur basé sur la technologie BLE qui intègre un amplificateur de faible bruit (LNA) à faible consommation et un nouveau mélangeur passif à fonction « ET »	8 dB

TABLE 3.5 – Évaluation du facteur de bruit dans la littérature pour des applications BLE

Une fois la puissance reçue et la puissance de bruit estimées, il est possible de définir le rapport signal à bruit, qui constitue l'un des indicateurs fondamentaux des performances d'une liaison radio.

Il est défini par :

$$SNR = \frac{P_r}{P_n} \leftrightarrow SNR_{dB} = P_{r,dBm} - P_{n,dBm} \quad (3.27)$$

où P_r désigne la puissance du signal utile et P_n la puissance totale de bruit.

Le SNR représente donc la marge dont dispose le signal utile par rapport au bruit. Plus cette marge est importante, plus la probabilité de décoder correctement les données est élevée.

Dans le cadre de ce mémoire, la puissance reçue sera estimée à partir du Received Signal Strength Indicator (RSSI) fourni par les smartphones Android. En première approximation, le RSSI peut être assimilé à la puissance moyenne reçue :

$$RSSI \approx P_{r,dBm} \quad (3.28)$$

Le rapport signal à bruit peut alors être estimé par l'équation (3.29).

$$SNR_{dB} \approx RSSI - P_{n,dBm} \quad (3.29)$$

Cette approximation suppose que le **RSSI** représente correctement la puissance du signal utile, ce qui est généralement acceptable pour des campagnes de mesures comparatives réalisées dans un même environnement avec les mêmes appareils.

Le rapport signal à bruit permet d'évaluer la qualité du canal radio mais ne renseigne pas directement sur les performances de transmission. Celles-ci sont généralement caractérisées par le taux d'erreur binaire (**Bit Error Rate (BER)**), qui correspond à la probabilité qu'un bit soit reçu de manière erronée.

Pour un canal additif gaussien (**AWGN**) et une modulation binaire cohérente, le **BER** est donné par :

$$BER = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (3.30)$$

où :

- E_b est l'énergie par bit ;
- N_0 est la densité spectrale du bruit (voir éq. (3.23)) ;
- $Q(\cdot)$ désigne la fonction Q de Gauss décrite par l'équation (3.31).

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (3.31)$$

Dans les expressions théoriques du **BER**, la grandeur pertinente est souvent E_b/N_0 . Celle-ci est liée au **SNR** par le rapport entre la bande passante du récepteur et le débit binaire utile. Ces équations montrent donc que le **BER** diminue rapidement lorsque le rapport signal à bruit augmente. Elles sont largement utilisées pour comparer théoriquement différentes modulations ou différents schémas de codage.

Cette formule ne constitue toutefois pas un modèle exact du **BLE Coded PHY**. En effet, celui-ci utilise une modulation **GFSK**. La spécification Bluetooth impose pour celle-ci un produit bande-durée $BT = 0,5$ et un indice de modulation compris entre 0,45 et 0,55, donc voisin de $h = 0,5$ [29]. Contrairement à la **BPSK**, il n'existe pas une expression analytique unique du BER de la **GFSK** ne dépendant que de E_b/N_0 . Les performances dépendent notamment du filtrage gaussien, de l'indice de modulation et de la structure du démodulateur utilisé.

Le fait que l'indice de modulation Bluetooth soit proche de $h = 0,5$ rapproche toutefois son fonctionnement de celui d'une modulation **MSK**, et plus particulièrement d'une **GMSK** lorsque le filtrage gaussien est pris en compte. Cette proximité permet d'utiliser, dans un modèle simplifié, les performances d'une **MSK/GMSK** cohérente comme référence. Dans un canal **AWGN** et pour un récepteur idéal, les performances de la **GMSK** peuvent être proches de celles obtenues avec une **BPSK**; des travaux consacrés à l'utilisation de la **GMSK** pour les communications spatiales montrent notamment qu'une structure de réception appropriée conduit à des performances pratiquement similaires à celles de la **BPSK**. Il est dès lors possible d'adopter, à titre d'approximation, l'expression

$$BER_{GMSK} \simeq Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (3.32)$$

à condition de préciser qu'il s'agit d'un modèle **GMSK/MSK** idéal et non de l'expression exacte du **BER** du récepteur Bluetooth intégré aux smartphones.

Cette approximation est principalement pertinente pour les **PHY** non codés LE 1M et LE 2M. Elle permet d'obtenir un ordre de grandeur théorique du taux d'erreur à partir du rapport E_b/N_0 , mais ne reproduit ni la structure exacte du démodulateur du Google Pixel 6 ni les éventuels traitements propriétaires réalisés par son contrôleur Bluetooth. La prudence est encore plus nécessaire pour la **PHY** LE Coded. En effet, LE Coded utilise la même modulation **GFSK** que

LE 1M et conserve un débit symbole de 1 Msym/s, mais ajoute un codage destiné à améliorer la détection et la correction des erreurs. Les débits d'information deviennent ainsi 500 kbit/s en S=2 et 125 kbit/s en S=8. L'expression précédente peut donc éventuellement représenter le comportement de la modulation avant décodage, mais elle ne permet pas à elle seule de déterminer le **BER** obtenu après les mécanismes de codage du LE Coded **PHY**.

Il convient par conséquent de distinguer le **BER** associé à la démodulation **GFSK** du **BER** final observé après décodage. Appliquer directement $Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)$ aux quatre modes LE 1M, LE 2M, LE Coded S=2 et LE Coded S=8 conduirait à attribuer implicitement tout le bénéfice de la réduction du débit au processus de démodulation, sans modéliser explicitement le codage utilisé par les modes S=2 et S=8. Dans ce travail, cette expression peut donc être retenue comme une approximation théorique pour les **PHY** non codées et, éventuellement, comme référence avant décodage pour LE Coded. Une estimation rigoureuse du **BER** final de S=2 et S=8 nécessiterait en revanche de modéliser séparément la **GFSK**, le codage correcteur et le processus de décodage, ou de disposer de courbes de performances expérimentales du récepteur considéré.

Dans ce mémoire, les performances expérimentales seront évaluées principalement au moyen d'une autre grandeur.

En effet, dans le cadre d'une campagne de mesures expérimentales réalisée entre deux smartphones Android, on peut utiliser une grandeur beaucoup plus accessible : le **Packet Error Rate (PER)**. Contrairement au **BER**, qui s'intéresse aux erreurs sur chaque bit individuel, le **PER** mesure la proportion de paquets qui ne sont pas reçus ou qui sont rejetés par le récepteur en raison d'erreurs de transmission.

Il est défini par :

$$PER = \frac{N_{\text{perdus}}}{N_{\text{envoyés}}} \quad (3.33)$$

où $N_{\text{envoyés}}$ est le nombre total de paquets transmis et N_{perdus} est le nombre de paquets non reçus ou invalides.

Cette grandeur peut être obtenue directement lors d'une campagne de mesures en comptabilisant les paquets effectivement reçus par le smartphone distant.

Le **PER** est directement lié au **BER**. Si un paquet comporte N bits et que les erreurs sont supposées indépendantes et de probabilité identique **BER**, la probabilité qu'au moins un bit soit erroné s'écrit :

$$PER = 1 - (1 - BER)^N \quad (3.34)$$

Pour de faibles probabilités d'erreur sur un bit et des paquets de données volumineux, cela correspond approximativement à $PER \approx N \cdot BER$. Cette approximation montre que, même en présence d'un **BER** relativement faible, les paquets de grande taille présentent une probabilité plus élevée d'être corrompus.

Les grandeurs théoriques introduites dans cette section seront utilisées dans les sections expérimentales suivantes. Le diagramme de rayonnement permettra d'évaluer l'influence de l'orientation du smartphone sur le **RSSI**, tandis que les mesures de réception en fonction de la distance permettront de relier expérimentalement les pertes de propagation, le **SNR** estimé et la fiabilité de la livraison des données au niveau applicatif.

3.3 Caractérisation angulaire expérimentale de la liaison **BLE**

Cette section vise à répondre à la question suivante : dans quelle mesure l'orientation relative de deux smartphones influence-t-elle la puissance reçue et la robustesse d'une liaison **BLE**?

Plusieurs diagrammes de rayonnement (en anglais, "Antenna Radiation Pattern") ont été effectués pour obtenir la plus fidèle représentation possible, sans chambre anéchoïque, de la puissance reçue et pour limiter les effets de la pièce de test.

Pour les expériences menées pour cette section, les téléphones sont toujours distants d'un mètre. Les smartphones sont dos à dos en position initiale sauf indication contraire. Lorsqu'on effectue une mesure pour un angle donné, on va capturer le **RSSI** toutes les trois secondes pendant 30 secondes. On prend donc 10 mesures par angle, dont on va ensuite prendre la moyenne pour la représenter sur le graphe. Toutes les mesures ont été réalisées en LE Coded S=8.

Les angles ϕ , θ et δ utilisés dans la suite sont définis à la figure 3.1 tandis que les trois axes de rotation considérés sont présentés à la figure 3.2.

La première expérience se fait selon une rotation d'axe z , comme l'illustre la figure 3.2a.

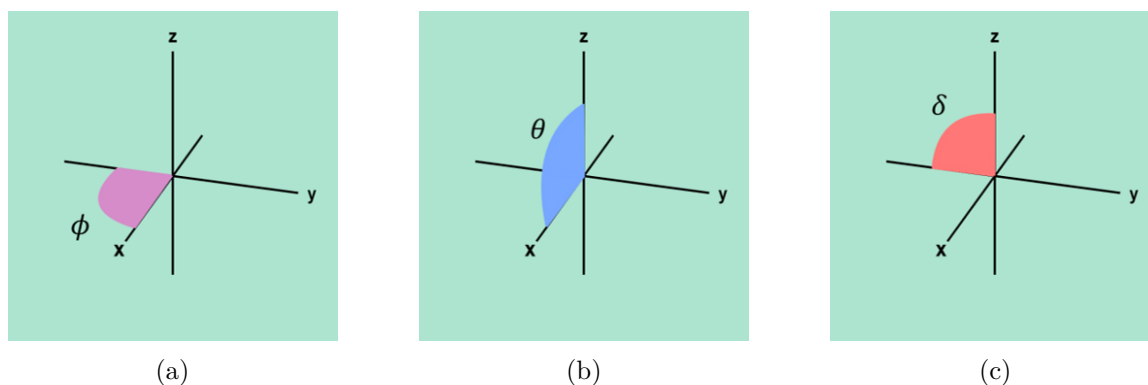


FIGURE 3.1 – Définitions des angles ϕ , θ et δ

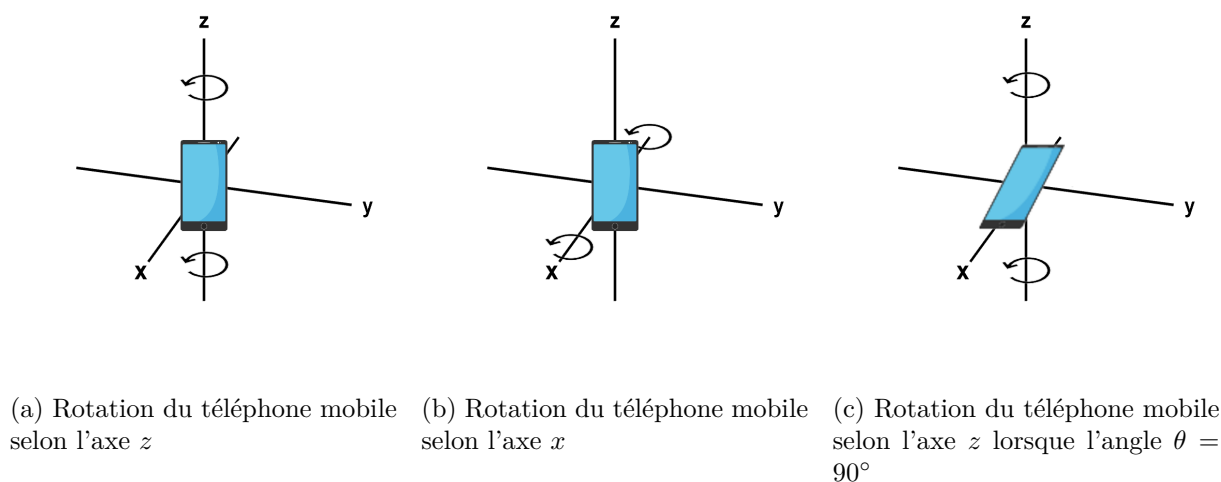


FIGURE 3.2 – Axe de rotations

Pour cette première série d'expériences, le téléphone tourne de 10° dans le sens horloger entre chaque prise de mesure selon l'angle ϕ . Chaque série est reconduite trois fois à des périodes différentes pour diluer les effets de température ou d'interférences ponctuelles.

La mise en place de l'expérience se trouve sur la figure 3.3. On prend les mesures sur le téléphone fixe.

Pour limiter les effets de la pièce et des différents meubles qui s'y trouvent, nous avons réalisé une nouvelle série de tests en décalant l'axe de la table de 30° par la gauche puis une nouvelle



FIGURE 3.3 – Disposition de la première expérience

série de tests où l'axe est décalé de 30° par la droite. À chaque fois, cette série d'expériences est répétée 3 fois.

Pour chaque ensemble de mesures, on obtient donc 30 échantillons. La moyenne de ceux-ci est représentée en rouge sur les graphes 3.4.

La première chose qui apparaît est que le RSSI varie nettement avec l'angle de rotation du téléphone. Sur les graphes, on peut observer des valeurs proches de -42 à -45 dBm dans certaines directions, et des valeurs pouvant descendre jusqu'à -65 dBm dans d'autres directions. Cela représente une variation de l'ordre de 20 dB, ce qui est significatif. Pour 20 dB, on a un facteur 100. On peut donc conclure que l'orientation du smartphone influence fortement la qualité de la liaison BLE. Le smartphone ne peut pas être assimilé à une antenne omnidirectionnelle.

Comme on peut le voir sur les différents graphes, les zones avec le meilleur RSSI se trouvent autour de 0° et autour de 180° . À l'inverse, les zones les moins favorables se trouvent autour de 270° et autour de 70° - 120° selon la configuration.

Un constat simple à effectuer est aussi que les expériences 1 à 3 de la figure 3.4a, les expériences 4 à 6 de la figure 3.4b et les expériences 7 à 9 de la figure 3.4c montrent une tendance globale commune. Les courbes individuelles ne sont pas parfaitement superposables mais elles gardent généralement les mêmes zones de maxima et minima.

Les variations observées ne sont pas uniquement dues au bruit, il y a une dépendance angulaire reproductible.

Contrairement à ce qui est attendu, il y a une divergence non-négligeable entre les différentes mesures. En effet, les formes changent, certains minima deviennent moins profonds, certains lobes apparaissent ou disparaissent, ... Cela indique que l'environnement dans lequel ces tests ont été effectués change la dépendance des mesures. Les mesures ne dépendent pas uniquement de l'orientation du téléphone mais également de l'environnement de propagation. Dans une pièce, les réflexions sur les murs, le sol, le plafond ou encore les objets environnants modifient le signal reçu. Le RSSI mesuré résulte donc de la combinaison du trajet direct et des trajets réfléchis.

La deuxième expérience se fait selon une rotation d'axe x comme l'illustre la figure 3.2b. À $\delta = 0^\circ$, le téléphone est en position verticale standard et à $\delta = 180^\circ$, le téléphone a la tête en bas. Le téléphone est accroché à une ventouse qui, elle-même, possède un crochet. Ce crochet est maintenu fixe dans un trou d'une boîte en carton et le téléphone est déplacé par palier de 15 degrés autour de l'axe de rotation (voir la figure 3.5b).

Comme précédemment, l'expérience est reconduite trois fois à des périodes différentes pour diluer les effets de température ou d'interférences ponctuelles. Et comme précédemment, l'expérience sera de nouveau reproduite trois fois avec un axe entre les téléphones décalé de 30° par

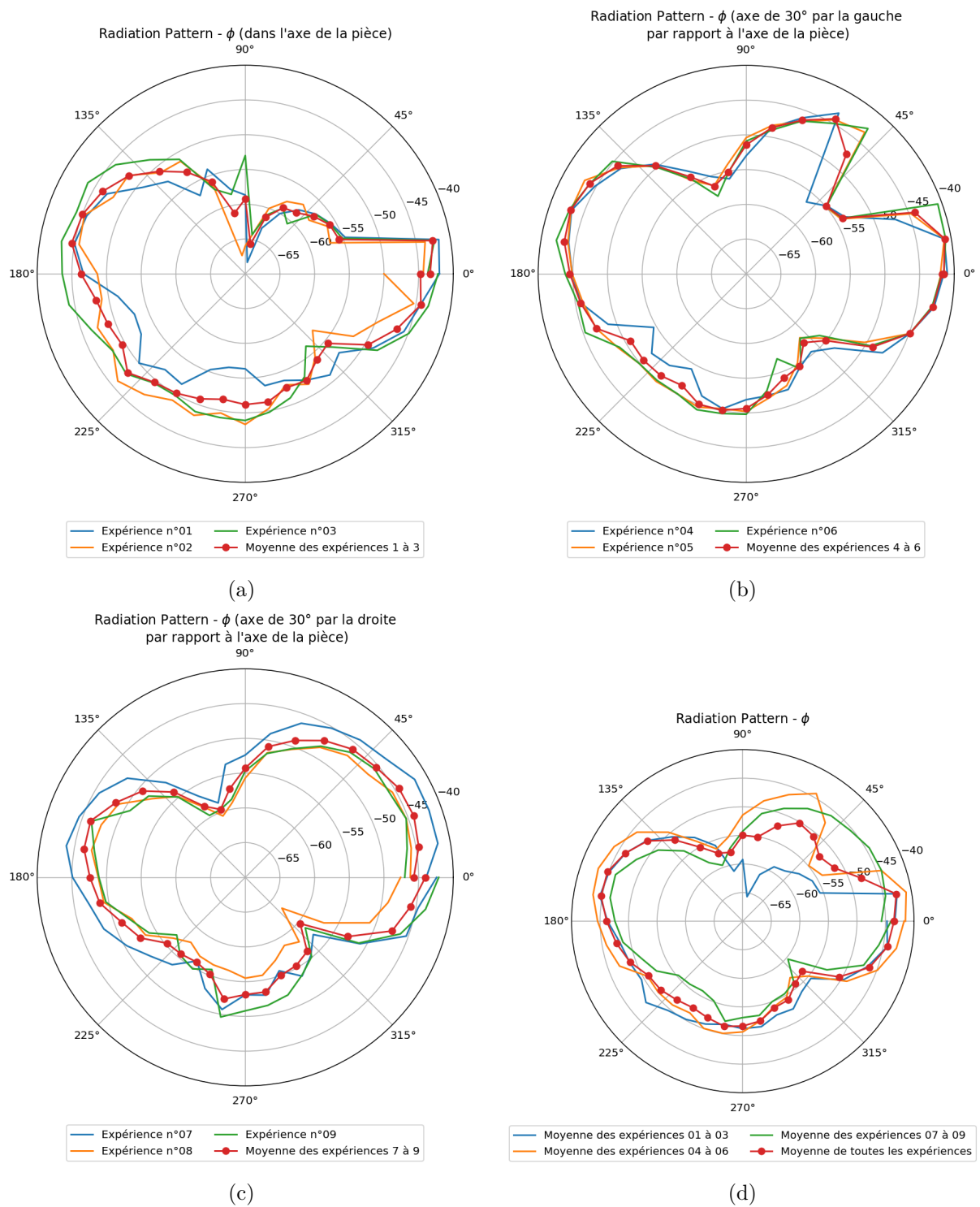


FIGURE 3.4 – Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe z

la gauche, puis la même chose pour un axe décalé de 30° par la droite.

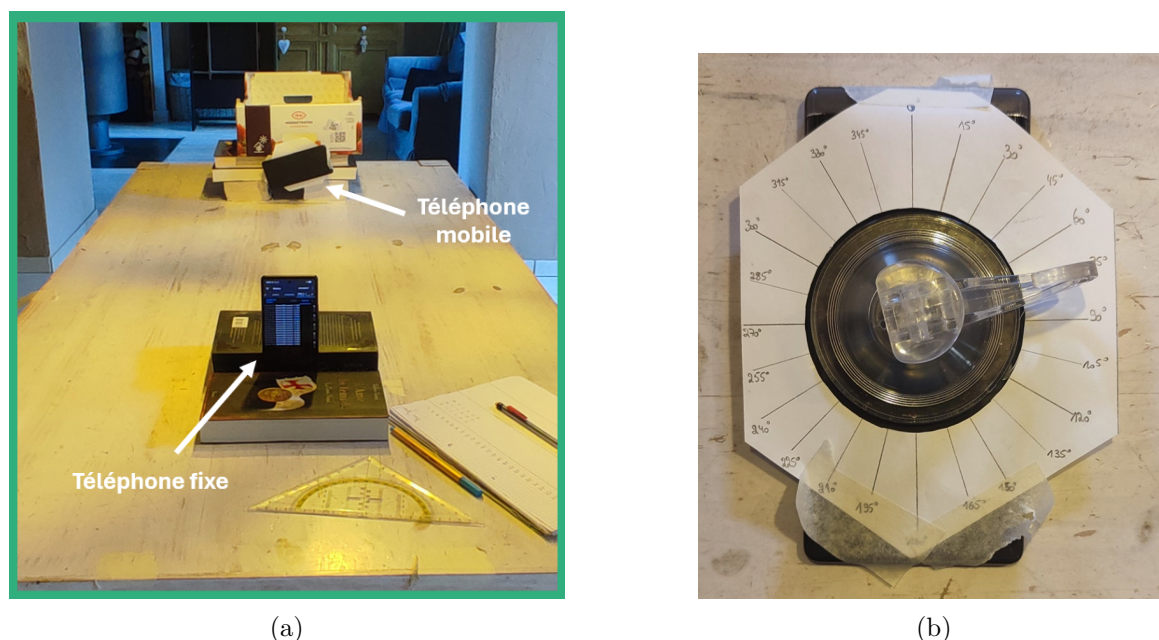


FIGURE 3.5 – Disposition de la deuxième expérience

Le premier constat est que le **RSSI** varie fortement avec l'angle δ . On observe des valeurs maximales autour de -43 dBm et des valeurs minimales pouvant aller jusqu'à -60 dBm. La variation totale est donc de l'ordre de 17 dB. Or une différence de 17 dB correspond à un facteur d'environ 50 en puissance reçue. C'est beaucoup. On peut conclure que cette rotation du téléphone modifie la qualité de la liaison **BLE** bien que pour la moyenne de toutes les expériences, l'amplitude descend à environ 7 dB ce qui représente un facteur 5 en puissance reçue.

La direction clairement défavorable se trouve autour de $\delta \approx 170^\circ - 190^\circ$ pour la figure **3.6a**. Cette orientation provoque une forte atténuation du signal. Cette atténuation peut venir de plusieurs phénomènes comme une orientation défavorable de l'antenne intégrée, le masquage de l'antenne par d'autres composants internes du téléphone, un effet de la batterie ou une modification de la polarisation.

On peut remarquer également que les graphes **3.6** sont plus "propres" que les graphes **3.4** : il y a moins de variations brutales isolées et la moyenne de chaque ensemble d'expériences ne diffère pas beaucoup des trois courbes individuelles. Cela peut indiquer que cette rotation est moins sensible aux effets de *multipath*.

Enfin, une troisième expérience se fait selon une rotation d'axe z , mais avec une position de départ positionnée en $\theta = 90^\circ$, comme l'illustre la figure **3.2c** de telle sorte qu'à $\phi = 0^\circ$, le téléphone est en position horizontale avec la prise du chargeur qui pointe vers le téléphone fixe.

Le téléphone est accroché avec le même dispositif de ventouse que l'expérience précédente et les changements de position se font par palier de 15 degrés.

Comme précédemment, l'expérience est reconduite trois fois à des périodes différentes pour diluer les effets de température ou d'interférences ponctuelles. Et comme précédemment, l'expérience sera de nouveau reproduite trois fois avec un axe entre les téléphones décalé de 30° par la gauche, puis la même chose pour un axe décalé de 30° par la droite.

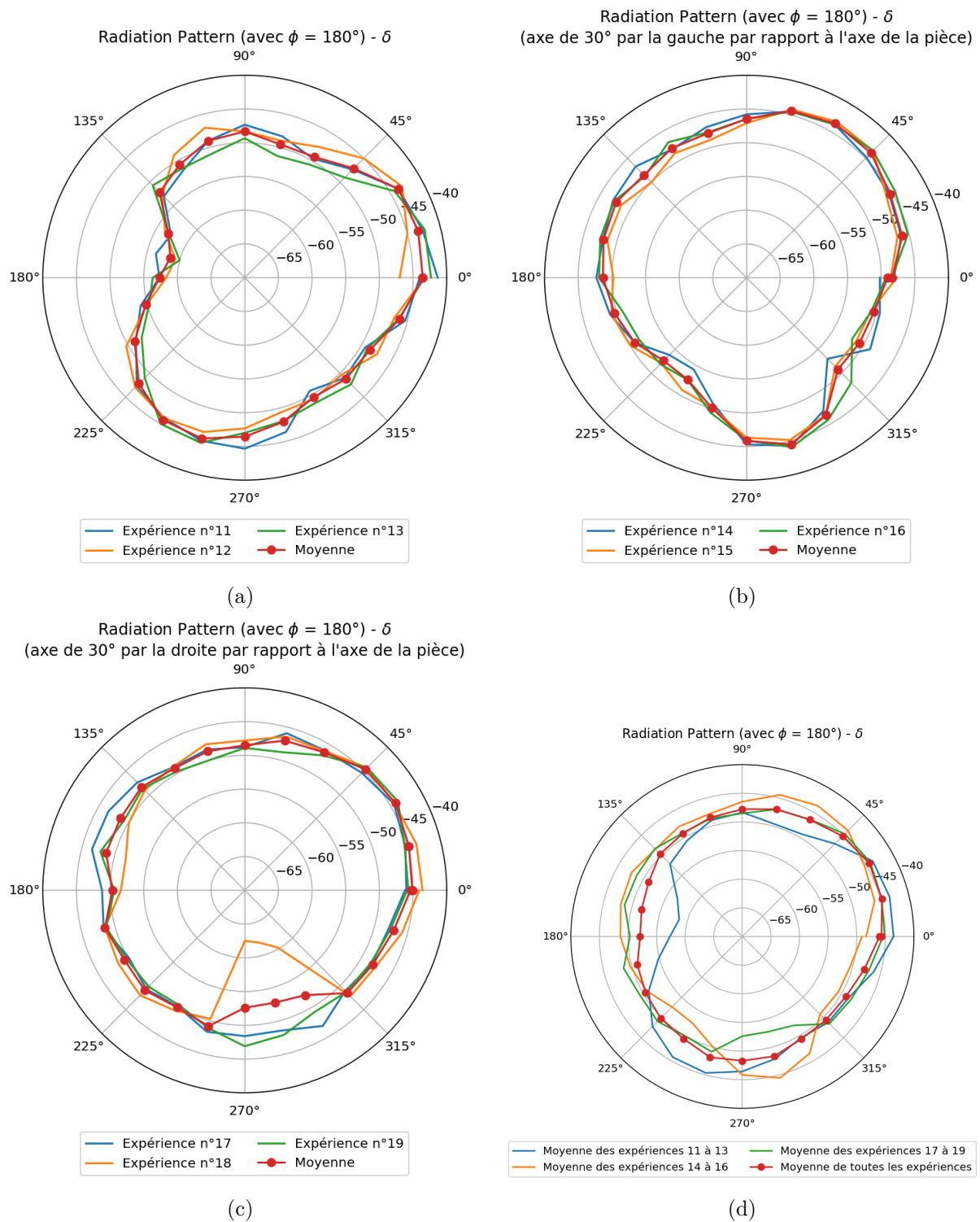


FIGURE 3.6 – Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe x

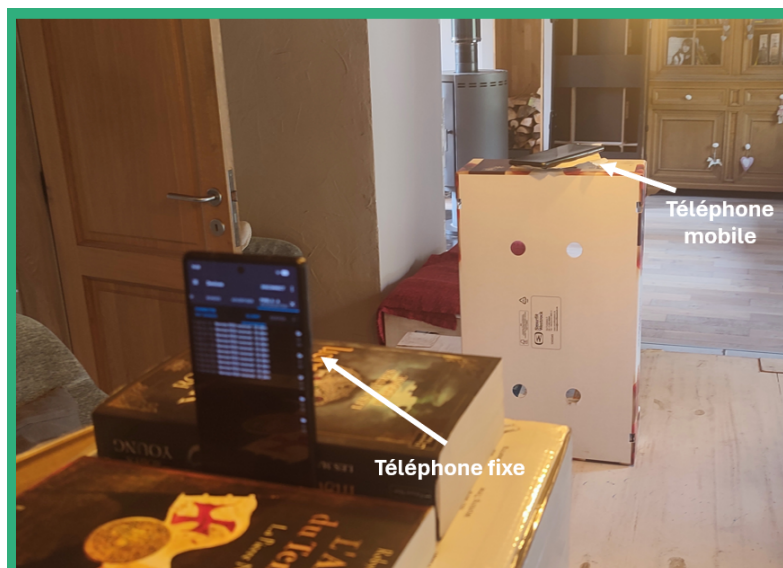


FIGURE 3.7 – Disposition de la troisième expérience

Sur les graphes relatifs aux résultats de ces expériences (figure 3.8), on remarque aisément que les signaux sont beaucoup plus bruités que précédemment, les variations sont plus fréquentes et parfois très abruptes.

La première conclusion est que le rayonnement n'est clairement pas isotrope dans le plan $\theta = 90^\circ$. Sur la moyenne des neuf expériences, le RSSI est globalement meilleur entre environ 90° et 160° , avec des valeurs proches de -46 à -49 dBm, tandis qu'une zone sensiblement moins favorable apparaît entre environ 220° et 290° , où le RSSI moyen descend vers -56 à -58 dBm. L'écart entre les directions les plus favorables et les moins favorables atteint donc de l'ordre de 10 dB, ce qui est loin d'être négligeable : une différence de 10 dB correspond à un rapport de puissance reçue d'environ 10. Il existe donc bien une dépendance significative de la puissance reçue à l'orientation relative des smartphones.

En revanche, la répétabilité fine est assez mauvaise. Les expériences 1 à 3 sont relativement cohérentes sur une grande partie du demi-plan supérieur, mais divergent fortement autour de 210° – 280° . Le même phénomène apparaît dans les séries 4-6 et 7-9, avec parfois des creux très prononcés présents lors d'une expérience mais absents lors des deux autres. Par exemple, certains essais descendent ponctuellement sous -65 dBm alors que les autres mesures réalisées à la même orientation restent plusieurs décibels au-dessus. Ces creux étroits sont donc peu susceptibles de représenter uniquement un zéro stable du diagramme propre de l'antenne. Ils sont beaucoup plus compatibles avec des phénomènes de fading par trajets multiples : une faible variation de position ou d'environnement peut modifier la phase relative des différentes composantes reçues et transformer une interférence destructive en interférence constructive.

Comme lors des expériences précédentes, les courbes obtenues après une rotation de 30° ne présentent pas simplement la même forme que la courbe moyenne en position initiale, décalée angulairement de 30° . Cette absence de correspondance suggère que l'environnement de mesure influence fortement la forme des diagrammes obtenus. Autrement dit, ces essais mettent bien en évidence une sensibilité à l'orientation, mais ils ne permettent pas d'isoler proprement le diagramme de rayonnement intrinsèque de l'antenne du Pixel 6.

Les différentes campagnes mettent ainsi en évidence une dépendance significative du **RSSI** à l'orientation relative des smartphones. Selon le plan de rotation et la configuration considérée, des écarts de plusieurs décibels, pouvant dépasser 10 dB, sont observés entre orientations favorables et défavorables. Cette dépendance est suffisamment reproductible pour montrer que

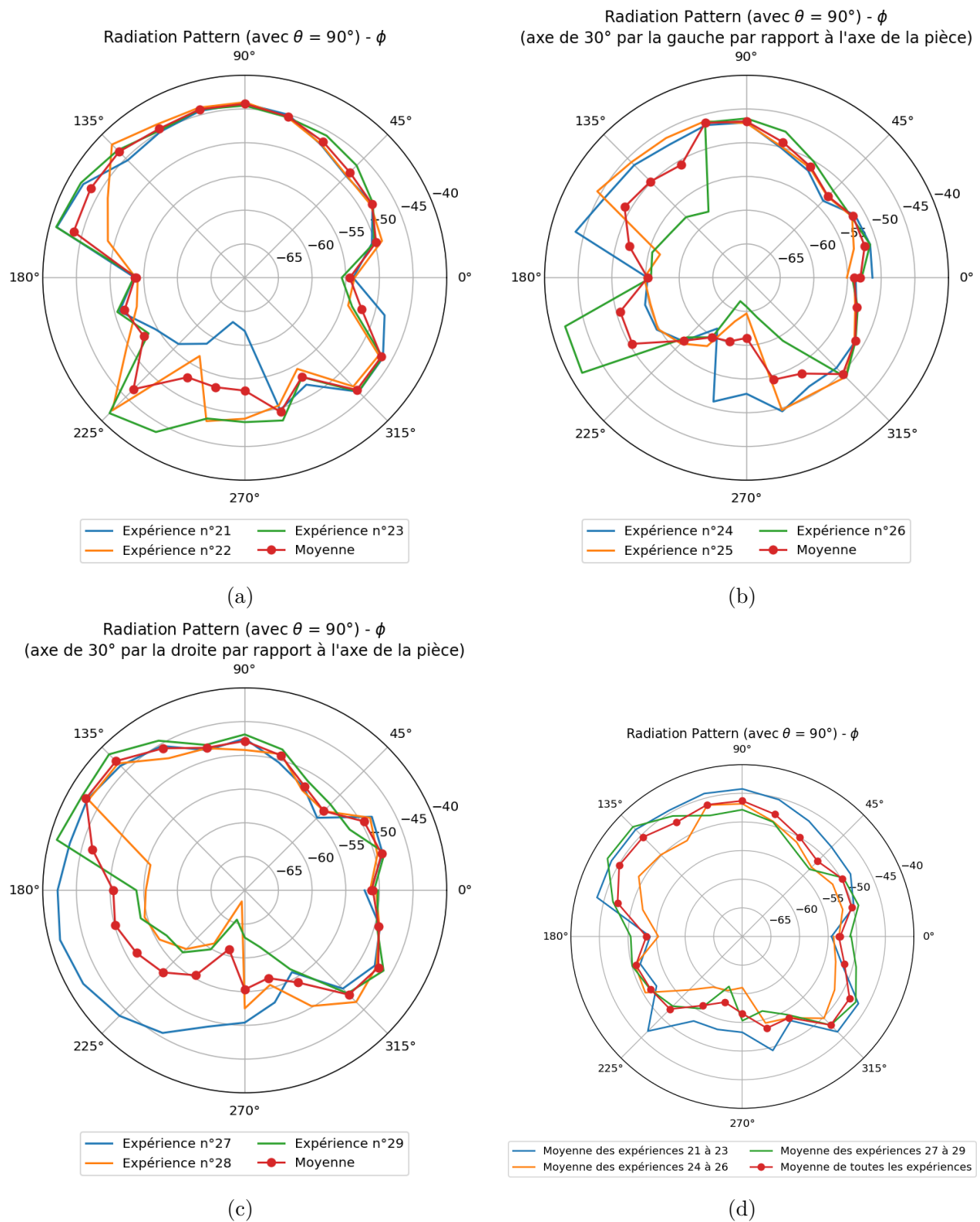


FIGURE 3.8 – Évolution du RSSI en fonction de l'orientation du smartphone pour une rotation d'axe z avec une position initiale en $\theta = 90^\circ$

l'orientation du terminal influence la liaison, mais les différences observées entre les répétitions et entre les configurations décalées de $\pm 30^\circ$ indiquent également une contribution importante des phénomènes de propagation multi-trajet.

Dans ces conditions, les mesures réalisées ne permettent pas d'identifier le gain absolu de l'antenne du Pixel 6 ni son diagramme de rayonnement intrinsèque. Elles permettent en revanche de caractériser une réponse angulaire relative de la liaison. En prenant comme référence l'orientation présentant le **RSSI** maximal, une atténuation angulaire relative peut être définie par

$$L_{\text{ang}}(\alpha) = \text{RSSI}_{\text{max}} - \text{RSSI}(\alpha) \quad (3.35)$$

Cette grandeur ne nécessite pas de connaître la puissance d'émission absolue et quantifie directement la dégradation de la liaison induite par une orientation moins favorable.

Expériences	RSSI_{max}	Angle pour lequel $L_{\text{ang}} = 0$
0x	-42.7 dBm	$\phi = 10^\circ$
1x	-44.37 dBm	$\delta = 30^\circ$
2x	-45.13 dBm	$(\theta = 90^\circ, \phi = 150^\circ)$

TABLE 3.6 – Valeurs du RSSI_{max} pour les moyennes des expériences selon l'orientation de celles-ci.

Ces résultats montrent finalement que l'orientation doit être considérée comme une source de variabilité du bilan de liaison entre smartphones. Dans le cadre d'un déploiement fixe en milieu forestier, le positionnement des terminaux peut donc influencer la marge disponible et doit être contrôlé autant que possible. À défaut, une marge supplémentaire doit être considérée lors de l'évaluation de la robustesse de la liaison.

Les expériences menées dans cette section et le tableau 3.6 nous indique que la position la plus favorable se trouve à 10° lorsque le téléphone est en position verticale. La différence entre 0° et -10° étant moins abrupte que la différence entre 10° et 20° , les expériences menées à la section 3.4 sont réalisées avec $\phi = 0^\circ$.

3.4 Réception en fonction de la distance : mesures expérimentales

Afin d'évaluer la portée de la liaison entre deux smartphones Google Pixel 6, une première campagne de mesures a été réalisée sur une section rectiligne du RAVeL (fig. 3.9). Un premier smartphone a été fixé en position verticale sur un support d'une hauteur de 1,30 m, l'écran orienté face au téléphone mobile. Le second smartphone a été déplacé progressivement le long du parcours tout en enregistrant la puissance du signal reçu (**RSSI**).

Dans un premier temps, les mesures ont été effectuées par incréments d'un mètre afin de caractériser précisément le comportement du signal à courte distance. Au-delà de cette zone, l'espacement entre les points de mesure a été augmenté progressivement jusqu'à atteindre des pas de 25 mètres.

Les deux smartphones maintenaient une connexion active permettant la lecture d'une caractéristique du périphérique distant, à savoir la valeur du champ Device Name. La validité de la connexion était vérifiée en confirmant que cette valeur correspondait à la chaîne de caractères prédéfinie « Kaczka » (choix du mot introduit directement dans le téléphone). Que cette condition soit satisfaite ou non, après cette tâche, la valeur du **RSSI** était relevée et enregistrée.



FIGURE 3.9 – Portion du RAVeL 156 entre Virelles et Vaulx utilisée pour la première campagne de mesures

La perte définitive de la liaison a été observée aux distances reprises dans la table 3.7

Pour la paramétrisation en BLE Coded PHY S=8, l'expérience a été répétée à deux reprises dans les mêmes conditions et a conduit au même résultat, confirmant ainsi la reproductibilité de la mesure.

Chaque expérience mesurait 3 fois le RSSI. La figure 3.10 présente la moyenne des puissances reçues en fonction de la distance.

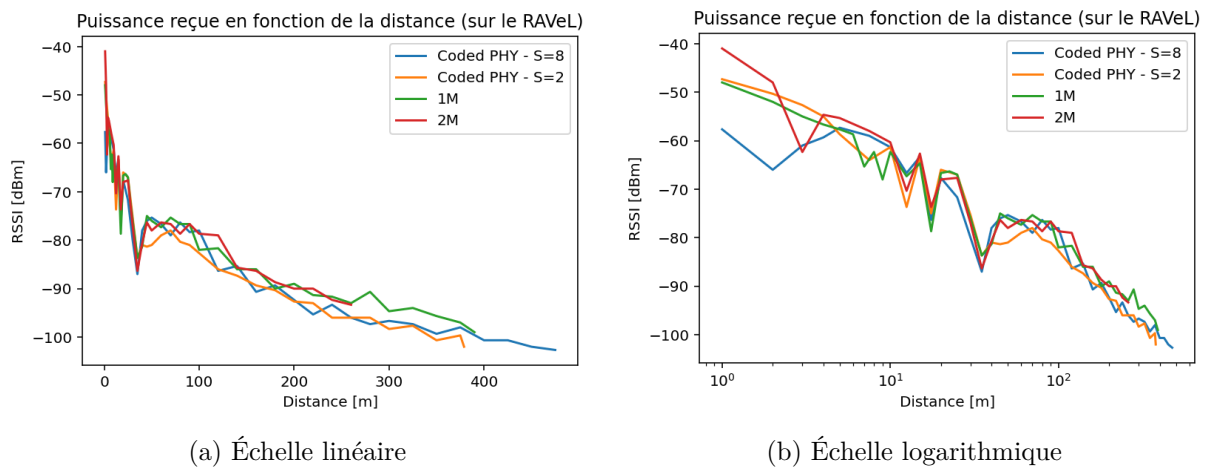


FIGURE 3.10 – Résultats de la première campagne de mesures pour la puissance reçue d'une communication entre deux smartphones Google Pixel 6, le long d'un RAVeL

Une expérience similaire a été conduite dans les bois de Presgaux pour observer la différence qu'il peut y avoir entre un environnement libre et un environnement boisé. Un premier smartphone a été fixé en position verticale sur un support lui-même attaché à un arbre à une hauteur de 3 m comme le recommande DRYAD pour l'installation de ses modules (figure 3.12). Le second smartphone a été déplacé progressivement le long d'un parcours rectiligne (voir figure 3.11) tout en enregistrant la puissance du signal reçu (RSSI).

Le *modus operandi* de la prise de mesure est le même que pour la première campagne de mesures sur le RAVeL. Les mesures sont d'abord effectuées tous les mètres avant de s'espacer

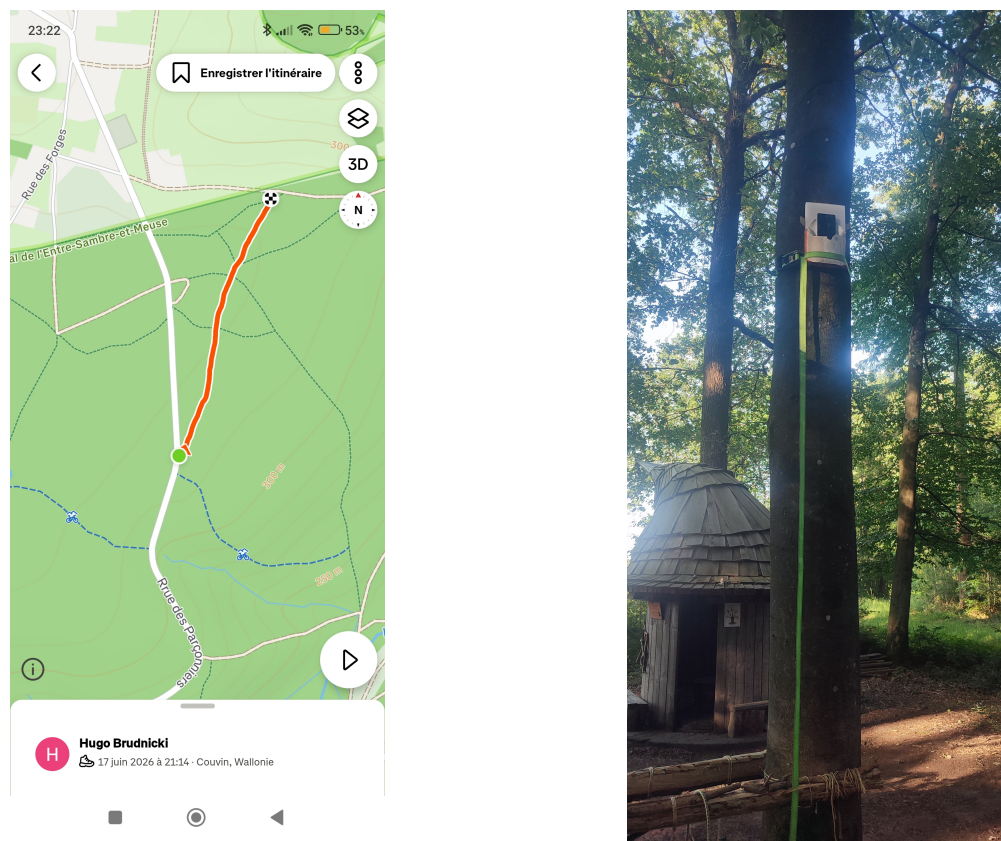


FIGURE 3.11 – Trajet dans les bois de la deuxième campagne de mesure (le drapeau à damier se trouve à l’endroit du téléphone fixe)

FIGURE 3.12 – Positionnement du téléphone à 3m de hauteur

- Capture d’écran Strava

de plus en plus pour atteindre des pas de 20 mètres.

Dans les bois, la perte définitive de la liaison a été observée à une distance bien plus courte que pour le cas en environnement libre sur le RAVeL. Ces distances sont reprises dans la table 3.7.

	PHY	Distance maximale sur le RAVeL	Distance maximale en forêt
	BLE 1M	390 m	200 m
	BLE 2M	260 m	192 m
BLE Coded	PHY S=2	379 m	217 m
BLE Coded	PHY S=8	475 m	240 m

TABLE 3.7 – Distance maximale de fonctionnement de la connexion BLE selon la PHY et l’environnement (limites de la figure 3.10 et la figure 3.13)

Comme on peut le voir sur les figures 3.14 et 3.15, la forêt est plutôt habitée par de grands chênes bien espacés et très peu de petits arbustes ou de végétation près du sol. Les principaux obstacles rencontrés sont des troncs.

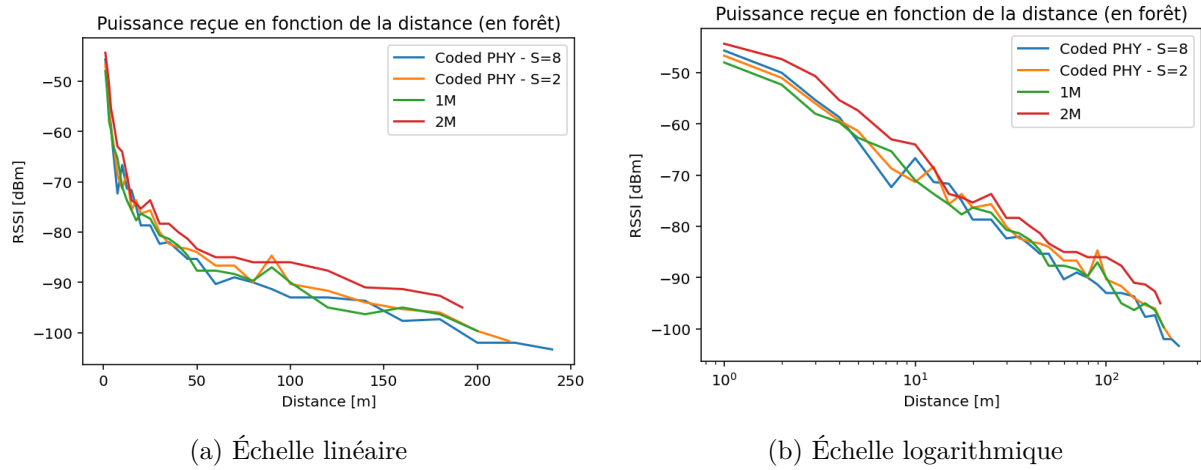


FIGURE 3.13 – Résultats de la deuxième campagne de mesures pour la puissance reçue d'une communication entre deux smartphones Google Pixel 6, dans la forêt



FIGURE 3.14 – Bois de Presgaux - Point de vue du téléphone fixe



FIGURE 3.15 – Bois de Presgaux - Point de vue du téléphone mobile à 160 m de distance du téléphone fixe

3.5 Bilan de liaison calibré et comparaison aux modèles théoriques

Le bilan de liaison introduit à la section 3.1 permet, dans sa forme générale, de relier la puissance reçue aux caractéristiques de l'émetteur, du récepteur et du canal de propagation. Il a été écrit sous la forme :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL - L_{add} \quad (3.36)$$

où PL représente l'ensemble des pertes associées au canal de propagation. Dans un environnement forestier, celles-ci peuvent notamment inclure une atténuation supplémentaire L_{veg} due à la végétation.

L'application directe de cette relation aux Google Pixel 6 se heurte toutefois à une difficulté importante. La puissance réellement utilisée par le contrôleur Bluetooth lors des échanges de données n'est pas directement accessible à partir de l'interface Android employée durant les expériences. De même, les mesures angulaires réalisées à la section 3.3 ont montré qu'il n'était pas possible d'isoler expérimentalement le gain absolu des antennes intégrées aux smartphones. Ces mesures permettent de caractériser une dépendance relative du RSSI à l'orientation, mais elles restent influencées par les réflexions et les phénomènes de trajets multiples. Enfin, certaines pertes internes ou liées au positionnement des appareils ne sont pas connues individuellement. Il serait donc peu rigoureux de fixer arbitrairement des valeurs de P_t , G_t , G_r et L_{add} afin de construire le bilan de liaison.

Ces différentes grandeurs peuvent néanmoins être regroupées dans un seul terme effectif :

$$C = P_t + G_t + G_r - L_{add} \quad (3.37)$$

Le bilan de liaison peut alors être réécrit :

$$P_r(d) = C - PL(d) \quad (3.38)$$

Le terme C ne représente pas une caractéristique intrinsèque d'un composant particulier. Il caractérise l'ensemble de la chaîne d'émission et de réception pour les deux smartphones, dans la configuration expérimentale considérée. Son intérêt est qu'il peut être déterminé directement à partir des mesures de RSSI, sans nécessiter la connaissance individuelle de la puissance d'émission ou du gain des antennes.

3.5.1 Calibration à partir des mesures en environnement dégagé

La première campagne réalisée sur le RAVeL constitue une référence adaptée à cette calibration. Les smartphones y ont été maintenus dans une configuration géométrique déterminée et la puissance reçue a été mesurée pour différentes distances. Cette campagne a par ailleurs été réalisée pour les quatre couches physiques étudiées : LE 2M, LE 1M, LE Coded S=2 et LE Coded S=8.

Une première possibilité consisterait à imposer une propagation en espace libre selon l'équation de Friis et à utiliser les mesures uniquement pour identifier la constante C . Cette approche conserverait cependant une dépendance imposée en $20 \log_{10}(d)$, alors que les mesures réalisées sur le RAVeL permettent directement d'évaluer la décroissance effective du RSSI avec la distance. Il est donc préférable d'utiliser un modèle log-distance calibré expérimentalement :

$$P_{r,m}^{RAV}(d) = P_{0,m}^{RAV} - 10n_m^{RAV} \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.39)$$

où m désigne la couche physique considérée, $P_{0,m}^{RAV}$ la puissance reçue estimée à une distance de référence d_0 et n_m^{RAV} l'exposant de perte de propagation obtenu expérimentalement.

Le modèle est linéaire par rapport à $\log_{10}(d/d_0)$. Les paramètres $P_{0,m}^{RAV}$ et n_m^{RAV} peuvent donc être estimés par régression à partir des couples expérimentaux $(d_i, RSSI_i)$. Ils sont choisis de manière à minimiser :

$$\sum_{i=1}^N \left[RSSI_i - \left(P_{0,m}^{RAV} - 10n_m^{RAV} \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right) \right) \right]^2 \quad (3.40)$$

Cette calibration présente l'avantage d'absorber dans $P_{0,m}^{RAV}$ les grandeurs matérielles inconnues telles que la puissance réellement transmise, les gains effectifs des antennes et certaines pertes d'implémentation. L'exposant n_m , quant à lui, décrit la décroissance expérimentale de la puissance reçue dans l'environnement de référence.

PHY	$P_{0,m}^{RAV}$	n_m^{RAV}	R^2	RMSE
LE 1M	-45.732	1.891	0.936	3.434
LE 2M	-44.274	1.933	0.903	4.148
LE Coded S2	-43.551	2.127	0.954	3.270
LE Coded S8	-48.431	1.868	0.888	4.813

TABLE 3.8 – Résultat des calibrations pour les quatre PHY avec $d_0 = 1$ m pour la campagne RAVeL

Les valeurs obtenues montrent alors directement dans quelle mesure la propagation observée s'écarte du comportement idéal en espace libre, pour lequel l'exposant de perte vaut $n=2$. Il faut cependant garder à l'esprit que les coefficients ainsi déterminés sont propres au trajet expérimental, à la hauteur des smartphones et à leur orientation. Ils constituent une calibration de la liaison étudiée et ne doivent pas être interprétés comme des constantes universelles des Google Pixel 6.

3.5.2 Introduction de l'atténuation due à la végétation

La campagne réalisée dans les bois de Presgaux permet ensuite d'étudier l'influence supplémentaire de la végétation. Le principe retenu consiste à utiliser le modèle calibré sur le RAVeL comme comportement de référence de la liaison, puis à lui ajouter les pertes excédentaires prévues par les modèles de végétation présentés à la section 3.1.2. Pour un modèle de végétation j , la puissance reçue devient ainsi :

$$P_{r,m,j}^{\text{forêt}} = P_{0,m}^{RAV} - 10n_m^{RAV} \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - L_{veg,j}(d) \quad (3.41)$$

Cette formulation présente un intérêt important par rapport au bilan de liaison non calibré. Les différences entre les modèles forestiers proviennent désormais essentiellement de la manière dont chacun représente l'atténuation provoquée par la végétation, tandis que la partie propre aux smartphones est commune et déterminée expérimentalement.

Les modèles FITU-R, COST 235, Weissberger et ITU-R peuvent être utilisés de cette manière puisqu'ils fournissent une atténuation excédentaire associée à la traversée de végétation. Les

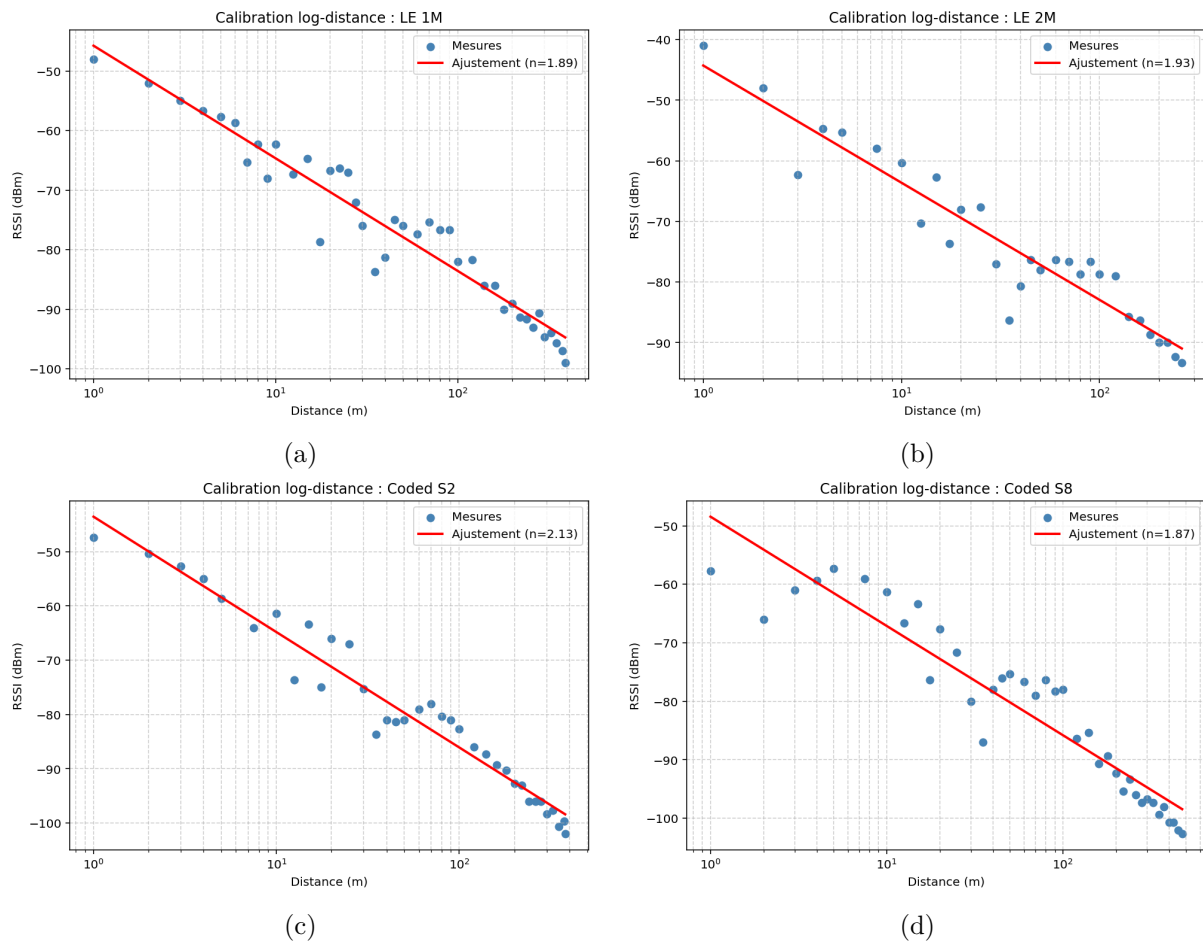


FIGURE 3.16 – Présentation des mesures expérimentales sur le RAVeL et du modèle log-distance calibré pour chaque **PHY**

modèles log-distance présentés précédemment doivent en revanche être traités différemment. Ils constituent déjà des modèles globaux de propagation et ne peuvent donc pas être ajoutés à la perte log-distance calibrée sous la forme d'un terme L_{veg} . Les utiliser comme une atténuation supplémentaire reviendrait à comptabiliser deux fois une partie des pertes liées à la distance.

Pour les modèles forestiers de type log-distance issus de la littérature, la comparaison est donc plutôt effectuée directement selon :

$$P_{r,m,k}^{LD} = P_{0,m} - 10n_k \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.42)$$

où n_k correspond à l'exposant proposé par le modèle considéré. La même valeur de référence $P_{0,m}$ est conservée afin que la comparaison porte principalement sur la vitesse de décroissance du signal avec la distance.

Une première évaluation peut alors être réalisée en appliquant ces différents modèles à la **PHY** LE Coded S=8. La figure 3.17 représente la puissance reçue prédite en fonction de la distance. Deux seuils sont également indiqués : la sensibilité minimale exigée par la spécification Bluetooth pour le LE Coded S=8, fixée à -82 dBm, et le niveau minimal de **RSSI** observé expérimentalement sur le Google Pixel 6 à proximité de la perte de connexion, d'environ -104 dBm. Ce dernier ne constitue pas une sensibilité métrologique du récepteur, mais un seuil opérationnel observé lors des campagnes de mesures.

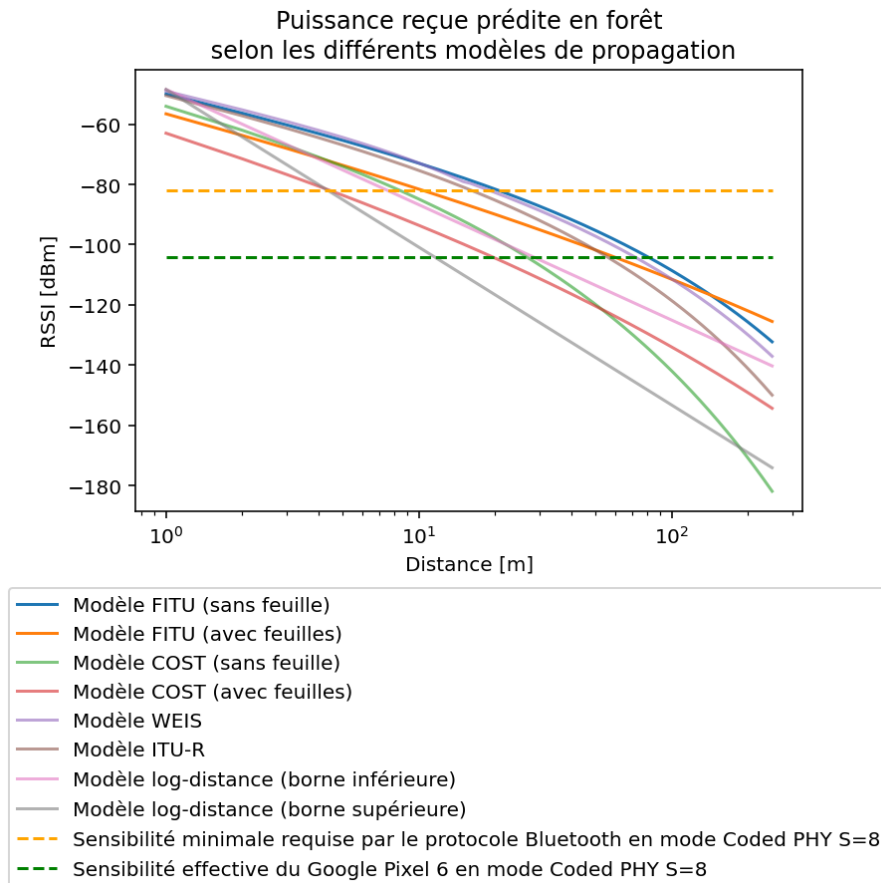


FIGURE 3.17 – Puissance reçue prédite en forêt selon les différents modèles de propagation

Les intersections entre les courbes de puissance reçue et ces deux seuils permettent d'obtenir une première estimation de la portée théorique. Les résultats sont repris dans la table 3.9.

Modèle	d à -82 dBm	d à -104 dBm
FITU (sans feuilles)	21 m	81 m
FITU (avec feuilles)	11 m	59 m
COST (sans feuilles)	9 m	27 m
COST (avec feuilles)	5 m	20 m
Weissberger	20 m	72 m
ITU-R	17 m	56 m
Log-distance $n = 3.83$	8 m	29 m
Log-distance $n = 5.24$	5 m	12 m

TABLE 3.9 – Distances seuils prédites par les modèles forestiers

Les modèles fournissent des estimations très dispersées. Même dans le cas le plus favorable, la portée prédite pour le seuil opérationnel de -104 dBm reste limitée à environ 81 m. Ces valeurs doivent toutefois être interprétées avec prudence : elles reposent sur des modèles empiriques génériques de végétation qui n'ont pas encore été confrontés aux mesures réalisées dans le bois de Presgaux. Leur pertinence pour le site étudié sera donc évaluée dans la section suivante.

3.5.3 Comparaison avec les mesures réalisées en forêt

La deuxième campagne fournit alors un jeu de données indépendant permettant de confronter les modèles aux conditions réellement rencontrées dans le bois de Presgaux. Dans cet environnement, la portée maximale observée reste relativement élevée (voir Table 3.7). Les photographies de la zone de mesure montrent toutefois une forêt relativement ouverte, constituée principalement de grands arbres espacés et présentant peu de végétation basse sur le trajet. Cette configuration doit être prise en compte lors de l'interprétation des modèles empiriques de végétation, dont les conditions expérimentales d'établissement peuvent être différentes.

Plutôt que de considérer a priori tous les modèles comme équivalents, leur pertinence pour le cas étudié peut maintenant être évaluée directement à partir des mesures. Pour chaque modèle j , l'écart entre le RSSI mesuré et la puissance prédite peut être quantifié à l'aide de l'erreur quadratique moyenne :

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [RSSI_i - P_{r,j(d_i)}]^2} \quad (3.43)$$

Une faible valeur de RMSE indique que le modèle reproduit correctement l'évolution moyenne de la puissance reçue dans le milieu étudié. Cette métrique ne permet pas pour autant d'affirmer que le modèle représente exactement les phénomènes physiques présents dans la forêt : plusieurs modèles empiriques peuvent produire des courbes proches malgré des formulations différentes. Elle fournit néanmoins un critère objectif pour déterminer lequel décrit le mieux les observations disponibles.

Les erreurs obtenues pour les différents modèles montrent cependant que leur capacité à représenter le milieu forestier étudié reste limitée. Le modèle FITU-R sans feuilles fournit la plus faible erreur parmi les modèles considérés, avec une RMSE d'environ 13,8 dB. Il est suivi par le modèle de Weissberger et par FITU-R avec feuilles, dont les RMSE valent respectivement environ 16,1 dB et 16,3 dB. À l'inverse, les modèles COST 235 présentent des écarts beaucoup plus importants, avec des RMSE comprises entre environ 35 et 41 dB. Ces erreurs sont à comparer aux RMSE de seulement quelques décibels obtenues lors de la calibration log-distance sur le RAVeL. La différence indique que l'incertitude principale ne provient plus ici de la calibration

de la liaison entre les smartphones, mais de la capacité des modèles génériques de végétation à représenter le site forestier étudié.

Modèle	RMSE
FITU model (sans feuilles)	13.77 dB
WEIS model	16.06 dB
FITU model (avec feuilles)	16.33 dB
ITU-R model	22.18 dB
log-model (avec $n = 3.83$)	26.43 dB
COST model (avec feuilles)	34.99 dB
COST model (sans feuilles)	40.86 dB
log-model (avec $n = 5.24$)	49.33 dB

TABLE 3.10 – **RMSE** obtenues par rapport aux mesures forestières pour les différents modèles

Même le meilleur modèle de la littérature conserve donc une erreur relativement élevée. Ce constat suggère que les conditions rencontrées dans le bois de Presgaux diffèrent sensiblement de celles ayant servi à établir ces modèles empiriques. Comme présenté lors de la campagne expérimentale, le site est constitué principalement de grands arbres relativement espacés, avec peu de végétation basse sur une grande partie du trajet. Les modèles empiriques considérés doivent par conséquent être vus comme des estimations générales de l'atténuation produite par une zone boisée plutôt que comme des prédictions exactes de la propagation dans cette forêt particulière.

Afin de disposer d'un modèle plus représentatif du milieu réellement étudié, la même procédure de calibration log-distance que celle utilisée sur le RAVeL a également été appliquée directement aux mesures forestières. Le modèle s'écrit :

$$P_{r,m}^{\text{forêt}}(d) = P_{0,m}^{\text{forêt}} - 10n_m^{\text{forêt}} \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.44)$$

Les paramètres $P_{0,m}^{\text{forêt}}$ et $n_m^{\text{forêt}}$ sont déterminés par régression linéaire pour chacune des quatre couches physiques Bluetooth étudiées.

PHY	$P_{0,m}^{\text{forêt}}$	$n_m^{\text{forêt}}$	R^2	RMSE
LE 1M	-47.541	2.217	0.989	1.477
LE 2M	-42.998	2.264	0.983	1.824
LE Coded S2	-46.209	2.245	0.984	1.804
LE Coded S8	-45.343	2.385	0.986	1.812

TABLE 3.11 – Résultat des calibrations pour les quatre **PHY** avec $d_0 = 1$ m pour la campagne forêt

Les coefficients de détermination obtenus sont tous supérieurs à 0,98, tandis que les **RMSE** restent inférieures à 2 dB. Le comportement moyen du **RSSI** en fonction de la distance est donc particulièrement bien représenté par un modèle log-distance directement calibré sur la forêt étudiée. Cette observation ne signifie pas que tous les phénomènes de propagation forestière sont décrits par une simple loi log-distance, mais montre qu'une telle loi constitue une approximation empirique efficace sur la plage de distances observée.

La comparaison des exposants de propagation obtenus sur le RAVeL et en forêt met par ailleurs clairement en évidence l'influence du milieu. Sur le RAVeL, les exposants n sont proches de la valeur $n=2$ associée à une propagation idéale en espace libre, avec des valeurs comprises

entre environ 1,87 et 2,13. Dans le bois de Presgaux, ceux-ci augmentent systématiquement et se situent entre environ 2,22 et 2,39. La puissance reçue décroît donc plus rapidement avec la distance en forêt qu'en environnement dégagé.

Les différences observées entre les quatre **PHY** ne doivent cependant pas être interprétées comme une modification fondamentale du canal de propagation en fonction du mode Bluetooth. Les quatre modes utilisent la même bande de fréquences autour de 2,4 GHz. Les faibles différences entre les exposants obtenus peuvent donc également refléter la variabilité expérimentale, l'estimation du **RSSI** et les différences entre les séries de mesures. L'information principale réside plutôt dans l'augmentation systématique de n lors du passage de l'environnement dégagé à l'environnement forestier.

3.5.4 Atténuation excédentaire observée en forêt

La calibration réalisée dans les deux environnements permet également d'évaluer directement l'atténuation supplémentaire observée lors de la campagne forestière. Pour une même distance d_i , celle-ci est définie par :

$$L_{exc,exp}(d) = \hat{P}_r^{RAV}(d) - P_r^{forêt}(d) \quad (3.45)$$

où $\hat{P}_r^{RAV}(d_i)$ représente la puissance qui aurait été attendue à cette distance selon le modèle calibré sur le RAVeL, tandis que $P_r^{forêt}(d_i)$ correspond à la puissance réellement mesurée dans le bois.

Cette grandeur ne doit pas être interprétée comme une mesure pure de l'absorption par la végétation. Les deux campagnes n'ont pas été réalisées dans des géométries parfaitement identiques, notamment en ce qui concerne la hauteur des smartphones et leur environnement immédiat. Elle représente donc plus généralement une atténuation excédentaire observée en environnement forestier, qui inclut l'effet de la végétation mais également les modifications de propagation propres au site.

Pour la **PHY** LE Coded S=8, les deux modèles log-distance calibrés sont :

$$\hat{P}_r^{RAV}(d) = -48.431 - 18.68 \log_{10}(d) \quad (3.46)$$

$$\hat{P}_r^{forêt}(d) = -45.343 - 23.85 \log_{10}(d) \quad (3.47)$$

Leur différence fournit une approximation lissée de l'atténuation excédentaire :

$$L_{exc,fit}(d) = \hat{P}_r^{RAV}(d) - \hat{P}_r^{forêt}(d) \quad (3.48)$$

soit :

$$L_{exc,fit}(d) = -3.088 + 5.17 \log_{10}(d) \quad (3.49)$$

avec $L_{exc,fit}$ exprimé en dB.

La présence de valeurs négatives à très courte distance ne signifie pas que la forêt amplifie physiquement le signal. Elle indique simplement que, pour ces premiers points, le **RSSI** mesuré en forêt est légèrement supérieur à celui prévu par la régression issue du RAVeL. Ce comportement peut notamment résulter des différences de géométrie entre les campagnes, des phénomènes de trajets multiples et de l'incertitude associée aux mesures **RSSI**. À mesure que la distance

augmente, l'effet de la pente plus importante observée en forêt devient dominant et l'atténuation excédentaire devient positive.

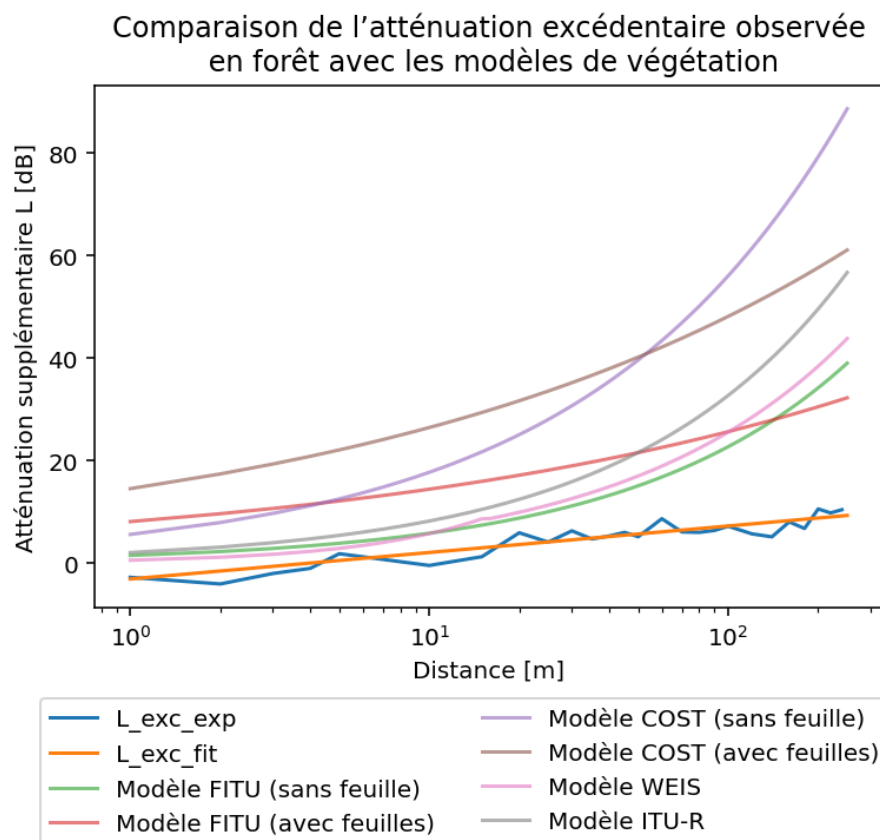


FIGURE 3.18 – Comparaison de l'atténuation excédentaire observée en forêt avec les modèles de végétation

La comparaison est particulièrement instructive. L'atténuation excédentaire observée expérimentalement reste relativement faible sur l'ensemble du trajet. Après les fluctuations présentes aux courtes distances, elle augmente progressivement et atteint typiquement quelques décibels, avec des valeurs de l'ordre de 5 à 10 dB aux plus grandes distances mesurées. L'évolution lissée obtenue à partir des deux régressions log-distance reproduit correctement cette tendance.

À l'inverse, la majorité des modèles empiriques de végétation prédisent une atténuation beaucoup plus importante. L'écart entre leurs courbes et les données expérimentales augmente généralement avec la distance. Certains modèles prévoient plusieurs dizaines de décibels de pertes supplémentaires alors que l'atténuation excédentaire réellement observée reste proche d'une dizaine de décibels sur la plage étudiée. Cette différence explique directement pourquoi les estimations de portée obtenues précédemment à partir de ces modèles étaient beaucoup plus faibles que les distances atteintes lors de la campagne expérimentale.

Le modèle FITU-R sans feuilles apparaît comme celui qui reste globalement le plus proche des observations parmi les modèles génériques étudiés, ce qui est cohérent avec sa RMSE plus faible. Il surestime néanmoins encore sensiblement les pertes mesurées. Les modèles COST 235 sont particulièrement pessimistes pour le milieu considéré et s'écartent rapidement de l'atténuation excédentaire expérimentale. L'emploi d'un modèle donné ne peut donc pas être justifié uniquement par sa compatibilité en fréquence ou par le fait qu'il ait été développé pour un milieu végétalisé : la structure réelle de la végétation constitue également un paramètre essentiel.

Cette comparaison apporte ainsi une réponse au choix du modèle de propagation pour le site

étudié. Aucun des modèles génériques considérés ne reproduit avec une précision satisfaisante les mesures réalisées dans le bois de Presgaux. Pour représenter spécifiquement cet environnement, le modèle log-distance calibré directement sur la campagne forestière constitue donc la meilleure approximation empirique parmi les modèles évalués. Les autres modèles restent néanmoins utiles afin d'illustrer la dispersion importante que peut introduire le choix d'un modèle de végétation lorsque aucune mesure locale n'est disponible.

3.5.5 Estimation de la portée à partir du modèle calibré

Le modèle log-distance forestier peut enfin être utilisé pour relier les mesures de propagation à un seuil de fonctionnement du récepteur. Pour la **PHY** LE Coded S=8, l'équation est reprise en **3.47**. Pour un seuil de puissance P_{seuil} , la distance correspondante peut être obtenue en inversant cette relation :

$$d_{seuil} = d_0 10^{\frac{P_{0,S8}^{forêt} - P_{seuil}}{10n_{S8}^{forêt}}} \quad (3.50)$$

Deux seuils peuvent être considérés. Le premier correspond à la sensibilité minimale exigée par la spécification Bluetooth pour le LE Coded S=8. Cette valeur constitue un seuil normatif conservateur et ne représente pas nécessairement la limite réelle du récepteur intégré au Pixel 6. Le second correspond au niveau de **RSSI** observé expérimentalement à proximité de la perte de connexion. Il doit être interprété comme un seuil opérationnel observé, et non comme une mesure métrologique de la sensibilité intrinsèque du récepteur.

En utilisant les paramètres obtenus lors de la calibration en forêt, soit $P_{0,S8}^{forêt} = -45.343$ dBm, $n_{S8}^{forêt} = 2.385$ et $d_0 = 1$ m, les distances présentées dans la table **3.12** sont obtenues.

Seuil considéré	Distance estimée [m]
Seuil normatif : -82 dBm	34.4
Seuil opérationnel : -104 dBm	287.7

TABLE 3.12 – Distances de fonctionnement estimées à partir du modèle log-distance calibré en forêt pour le LE Coded S=8

La différence importante entre ces deux distances illustre la distinction entre une exigence normative et les performances effectives du matériel utilisé. Le seuil de -82 dBm correspond à la sensibilité minimale qu'un récepteur compatible avec le LE Coded S=8 doit atteindre. Il conduit ici à une portée d'environ 34.4 m. Cette valeur ne constitue donc pas une prédiction de la portée maximale du Google Pixel 6, mais plutôt une estimation conservatrice fondée uniquement sur les performances minimales garanties par la spécification.

À l'inverse, l'utilisation du seuil opérationnel de -104 dBm conduit à une distance estimée d'environ 287.7 m. Cette valeur est du même ordre de grandeur que la portée maximale de 240 m observée expérimentalement dans le bois de Presgaux. Le modèle surestime ainsi la portée observée d'environ 20 %. À la distance expérimentale maximale de 240 m, le modèle log-distance prédit un **RSSI** d'environ -102.1 dBm, soit seulement quelques décibels au-dessus du seuil opérationnel considéré.

Cet écart est compatible avec la nature statistique du modèle. La régression log-distance représente l'évolution moyenne du **RSSI** avec la distance et ne reproduit pas les fluctuations locales dues au fading, aux trajets multiples ou à la présence ponctuelle d'obstacles. Pour le LE Coded S=8, la **RMSE** obtenue lors de la calibration forestière vaut environ 1.8 dB. Une

fluctuation de cet ordre à proximité de la limite de fonctionnement suffit donc à rapprocher la puissance instantanée reçue du niveau auquel la connexion devient instable.

Il faut également rappeler que la rupture d'une connexion Bluetooth ne dépend pas d'un seuil strict de **RSSI**. En raison des mécanismes d'acquiescement et de retransmission de la couche liaison **BLE**, la rupture d'une connexion ne dépend pas d'un seuil strict de **RSSI**. Ce comportement sera également observé expérimentalement à la section 3.6.2. La connexion n'est définitivement interrompue que lorsque les échanges ne peuvent plus être maintenus pendant une durée suffisante, conduisant notamment à l'expiration du délai de supervision. Le seuil de -104 dBm ne doit donc pas être interprété comme une frontière déterministe entre connexion et déconnexion.

La comparaison avec les résultats expérimentaux montre néanmoins que le modèle log-distance calibré localement fournit une estimation nettement plus représentative du comportement réel de la liaison que les modèles génériques de végétation étudiés précédemment. Ces derniers prédisaient des atténuations excédentaires beaucoup plus importantes et conduisaient par conséquent à des portées nettement inférieures aux observations. La calibration sur le site étudié permet au contraire de reproduire l'évolution du **RSSI** avec une **RMSE** inférieure à 2 dB et d'obtenir une portée théorique du même ordre de grandeur que la portée effectivement mesurée.

Pour la suite du travail, la valeur de 240 m mesurée expérimentalement sera néanmoins privilégiée comme portée de référence en environnement forestier. En effet, celle-ci correspond directement à la performance observée dans les conditions réelles du site étudié, tandis que les 288 m obtenus par le modèle représentent une extrapolation de la tendance moyenne du **RSSI** jusqu'au seuil opérationnel. Le modèle calibré est donc utilisé principalement comme outil d'interprétation de la propagation et de comparaison avec les modèles théoriques, tandis que la mesure expérimentale constitue la donnée la plus pertinente pour le dimensionnement du réseau étudié au chapitre suivant.

3.6 Évaluation des performances de la liaison

3.6.1 Mesure du SNR sur une liaison BLE

En combinant les équations 3.29 et 3.26 avec les valeurs de **RSSI** obtenues dans la section précédente, on observe les **SNR** suivants pour les différents modes de connexion Bluetooth.

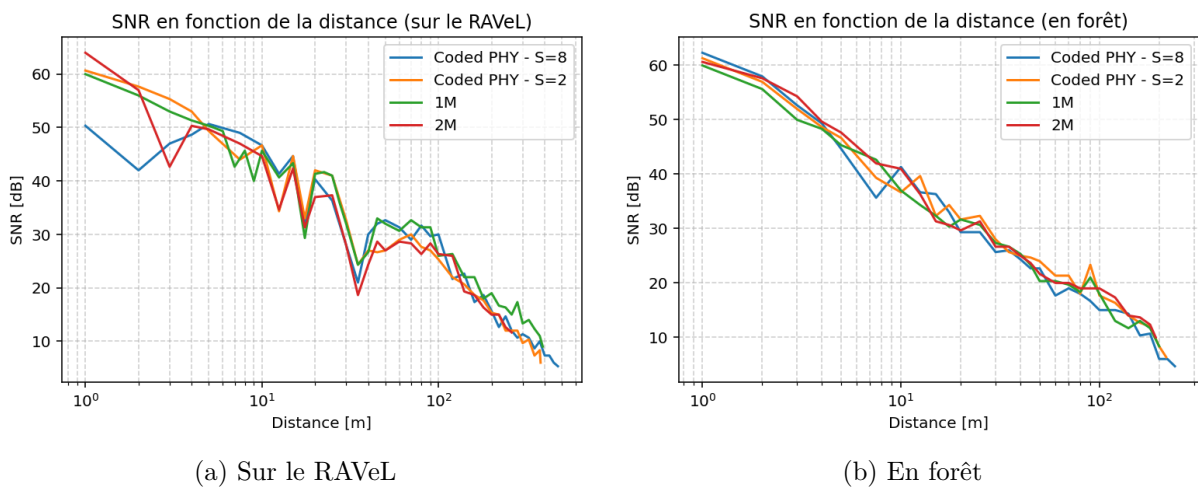


FIGURE 3.19 – Évaluation du SNR dans différents milieux

La bande réelle du récepteur du Google Pixel 6 n'étant pas documentée, il s'agit ici d'une

approximation de la valeur de B à partir du débit symbole :

$$B = \begin{cases} 1 \text{ MHz} & \text{LE 1M} \\ 2 \text{ MHz} & \text{LE 2M} \\ 1 \text{ MHz} & \text{LE Coded S=2} \\ 1 \text{ MHz} & \text{LE Coded S=8} \end{cases} \quad (3.51)$$

Une autre donnée intéressante peut être observée à partir du **SNR** : le rapport entre l'énergie par bit et la densité spectrale de puissance du bruit, E_b/N_0 , aussi appelé **SNR** par bit dans la suite du travail.

Avec $SNR = \frac{P_s}{N_0 B}$ et $E_b = \frac{P_s}{R_b}$, nous obtenons l'équation suivante :

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \frac{B}{R_b} \quad \leftrightarrow \quad \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} = SNR_{dB} + 10 \log_{10} \left(\frac{B}{R_b} \right) \quad (3.52)$$

On peut alors observer une différence d'environ 9 dB entre le **SNR** classique (figure 3.19) et le **SNR** par bit (figure 3.20) pour la connexion **BLE** Coded **PHY** S=8 alors qu'il n'y a pas de différences pour la connexion **BLE** 1M ou BLE 2M. Cela illustre pourquoi le Coded **PHY** peut continuer à fonctionner pour des **SNR** plus faibles.

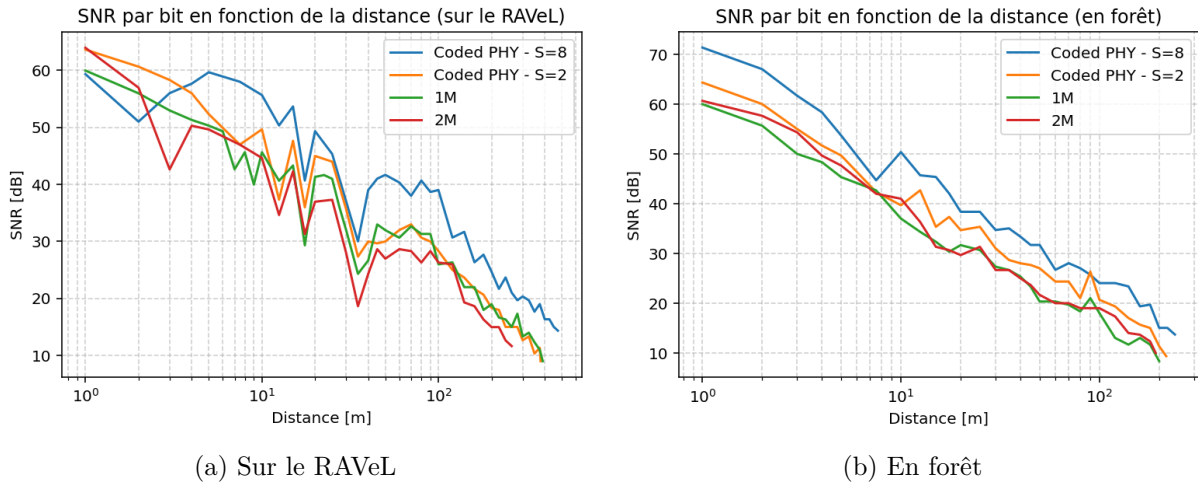


FIGURE 3.20 – Évaluation du SNR par bit dans différents milieux

3.6.2 Mesure du taux de livraison des paquets sur une liaison BLE

Afin de compléter les mesures de portée et de **RSSI**, une campagne expérimentale a été envisagée pour caractériser la fiabilité de la liaison entre les deux Google Pixel 6. L'objectif initial était de déterminer le **PER**, c'est-à-dire la proportion de paquets radio reçus avec erreur. Une telle mesure devait notamment permettre d'observer une éventuelle dégradation progressive de la qualité de la liaison lorsque la distance entre les deux smartphones augmente, avant la perte complète de la connexion.

La liaison a été réalisée au moyen de l'application Android nRF Connect. Le Pixel A a été configuré comme périphérique **BLE**, *advertiser* et serveur **GATT**, tandis que le Pixel B jouait le rôle de central et de client **GATT**. Un service **GATT** personnalisé a été créé sur le Pixel A, contenant une caractéristique autorisant les écritures. Le Pixel B transmettait alors automatiquement une succession de messages vers cette caractéristique. Afin de pouvoir identifier individuellement chaque message reçu, une charge utile de 16 octets a été utilisée. Les quatre

premiers octets contenaient un numéro de séquence croissant, tandis que les douze octets suivants contenaient le motif constant 0xA5. Un paquet pouvait, par exemple, prendre la forme :

00 00 00 02 A5 A5 A5 A5 A5 A5 A5 A5 A5 A5 A5.

Une macro nRF Connect a ensuite été développée afin d'automatiser l'expérience. Celle-ci sélectionnait la couche physique souhaitée, puis transmettait successivement les messages en utilisant des écritures **GATT** de type *Write Without Response*. Ce mode a été choisi afin d'éviter l'utilisation d'un acquittement au niveau **ATT** pour chaque écriture. Lors des essais réalisés en forêt, des séries de 300 messages ont été envoyées pour différentes distances entre les deux smartphones. Le journal généré sur le Pixel A était ensuite exporté et traité automatiquement au moyen d'un script Python. Ce dernier extrayait les numéros de séquence reçus et calculait le **Packet Delivery Ratio (PDR)** selon :

$$PDR = \frac{N_{RX,unique}}{N_{TX}} \quad (3.53)$$

où N_{TX} représente le nombre de messages transmis et $N_{RX,unique}$ le nombre de numéros de séquence distincts observés dans le journal du récepteur. Le taux de pertes observable au niveau applicatif pouvait alors être défini par :

$$PER_{app} = 1 - PDR. \quad (3.54)$$

Les essais ont cependant donné un résultat particulier : tant que la connexion **BLE** restait établie, les 300 messages étaient systématiquement retrouvés dans le journal du Pixel A, conduisant à un PDR de 100%. Ce comportement a notamment été observé pour toutes les distances testées entre 10 et 200 m (par pas de 10m). Lorsque les conditions de propagation devenaient trop défavorables, aucune diminution progressive du **PDR** n'était observée ; la connexion finissait plutôt par être interrompue et nRF Connect signalait une erreur 0x08 - **Connection Timeout**.

Cette observation s'explique par le fonctionnement de la couche liaison Bluetooth Low Energy. L'utilisation d'un *Write Without Response* supprime bien la réponse au niveau du protocole **ATT**, mais elle ne supprime pas les mécanismes de fiabilité de la couche liaison **BLE**. Les **PDU** transmis dans une connexion **BLE** sont acquittés au niveau de la couche liaison et un **PDU** qui n'est pas correctement reçu, notamment à cause d'une erreur de **CRC**, peut être retransmis automatiquement [36]. Ces retransmissions sont gérées par le contrôleur Bluetooth et restent invisibles pour l'application Android et pour nRF Connect. Un message peut ainsi nécessiter plusieurs tentatives radio avant d'apparaître une seule fois dans le journal **GATT** du Pixel A.

Le **PDR** mesuré par cette méthode ne constitue donc pas une mesure du **PER** physique. Il caractérise uniquement la proportion de messages finalement délivrés à l'application après les mécanismes internes de retransmission de **BLE**. Lorsque le canal se dégrade, le contrôleur tente de maintenir la connexion en retransmettant les **PDU**. Si aucun paquet valide ne peut être échangé pendant une durée suffisante, le délai de supervision de connexion expire et la liaison est interrompue. Le comportement observé expérimentalement est donc davantage de type « transmission fiable tant que la connexion est maintenue, puis rupture de la liaison » qu'une augmentation progressivement observable du taux de pertes au niveau **GATT**.

Cette expérience met ainsi en évidence une limite de l'utilisation de nRF Connect et des **API** Bluetooth Android pour caractériser directement les performances de la couche physique. Le véritable **PER** nécessiterait l'observation des tentatives de transmission et des retransmissions réalisées par la couche liaison, informations qui ne sont pas exposées par l'**API** Android utilisée. Dans la suite du travail, la qualité de la liaison est dès lors caractérisée prioritairement au

moyen du **RSSI** de la distance maximale de maintien de la connexion et, éventuellement, de la probabilité qu’une série complète de messages puisse être transmise sans interruption. Le **PDR** applicatif reste néanmoins une mesure utile pour confirmer que, tant que la connexion est maintenue, les messages sont effectivement délivrés de manière fiable à l’application.

3.6.3 Marge de liaison

La marge de liaison constitue un indicateur complémentaire permettant d’évaluer la robustesse d’une communication radio. La marge de liaison, définie à l’équation 3.19, peut maintenant être évaluée à partir des RSSI mesurés.

Une marge positive indique que la puissance reçue est supérieure au seuil de sensibilité considéré, tandis qu’une marge négative signifie que ce seuil est dépassé. Dans cette étude, P_{sens} correspond à la sensibilité minimale imposée par la spécification Bluetooth pour chaque **PHY**. Il s’agit donc d’un seuil normatif et non de la sensibilité réelle du contrôleur Bluetooth intégré au Google Pixel 6.

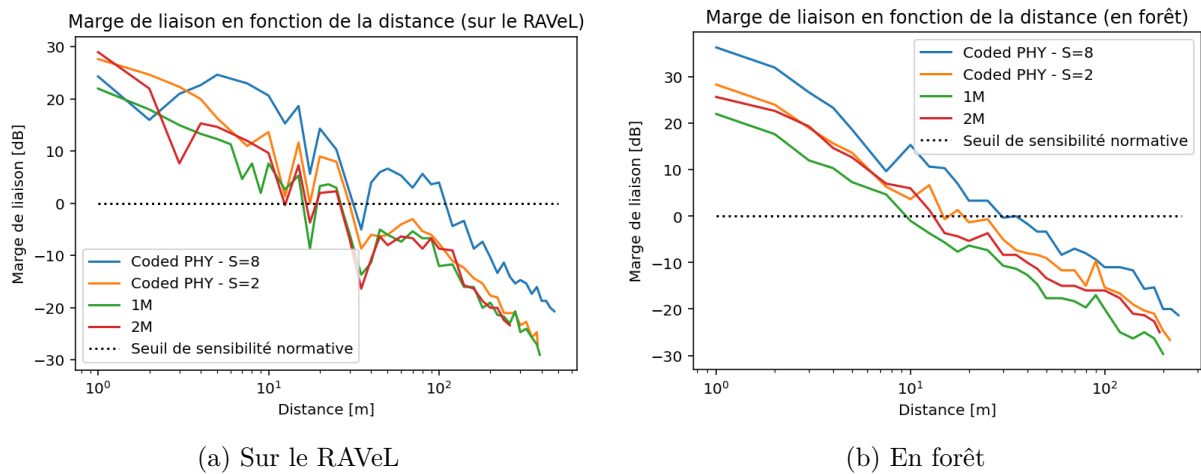


FIGURE 3.21 – Marge de liaison en fonction de la distance

Les figures 3.21a et 3.21b présentent l’évolution de cette marge en fonction de la distance respectivement sur le RAVeL et dans le bois de Presgaux. Dans les deux environnements, la marge diminue globalement lorsque la distance augmente, conformément à l’augmentation des pertes de propagation. La **PHY** LE Coded S=8 présente généralement la marge la plus importante, ce qui s’explique principalement par sa meilleure sensibilité normative. Sur le RAVeL, les courbes présentent davantage de fluctuations locales, cohérentes avec les variations de **RSSI** observées lors de la campagne expérimentale. En forêt, la décroissance est plus régulière et plus rapide, en accord avec l’exposant de propagation plus élevé déterminé précédemment.

Il est toutefois remarquable que la communication reste possible bien après que la marge calculée par rapport au seuil normatif devient négative. Ce comportement ne constitue pas une contradiction : la spécification Bluetooth fixe une performance minimale que doit satisfaire un récepteur compatible, mais le récepteur du Pixel 6 peut présenter une sensibilité effective sensiblement meilleure. Les essais ont ainsi permis de maintenir une connexion jusqu’à 475 m sur le RAVeL et 240 m en forêt en LE Coded S=8, alors que la marge normative avait déjà franchi 0 dB bien auparavant. La marge calculée doit donc être interprétée comme un indicateur conservateur de robustesse plutôt que comme un critère déterministe de perte de connexion.

Chapitre 4

Évaluation de la couverture

Dans ce chapitre, l'objectif est de voir si une connexion entre téléphones par **BLE** Coded **PHY** S8 est envisageable pour pouvoir remplacer la technologie déjà en place chez DRYAD.

4.1 Cas d'étude pour simulation

Les spécifications de DRYAD nous apprennent plusieurs choses concernant la pose des capteurs, des passerelles maillées et des passerelles frontières.

Pour les capteurs, selon les conditions de DRYAD, il faut s'assurer qu'un mesh gateway se trouve toujours à portée, c'est-à-dire à moins d'un kilomètre du sensor.

Il y a également la répartition des capteurs à travers la forêt qui se fait de manière différente selon le **WUI**. DRYAD recommande une densité de 0.7 capteur par hectare pour une **WUI** dense, c'est-à-dire lorsque la zone est souvent occupée par les activités humaines (routes, chemins forestiers, zones de pique-nique ou de bivouac, ...). Cette densité représente une distance entre capteurs de 80 à 100 mètres. Pour une activité humaine faible, autrement dit une **WUI** clairsemée, la densité recommandée passe à 0.1 capteur par hectare, soit une distance de 400 à 500 mètres entre les capteurs.

Pour les passerelles maillées, les indications sont les suivantes : la portée des passerelles maillées vers les passerelles frontières ou vers d'autres passerelles maillées est de l'ordre de 2 à 3 kilomètres. La distance varie selon la topologie du milieu.

Une des conditions du réseau mesh est qu'il n'y a pas qu'un unique chemin pour transmettre l'information. Les passerelles maillées doivent donc pouvoir communiquer avec au moins deux autres passerelles maillées (ou seulement une seule si nous nous trouvons en fin de parcours de l'information).

Enfin, il y a le ratio capteurs - passerelles maillées et le ratio passerelles maillées - passerelles frontières qui déterminent le nombre de passerelles qui seront utilisées dans la simulation. Une passerelle maillée supporte 100 capteurs Wildfire maximum. Une passerelle frontière supporte 20 passerelles maillées maximum.

Une dernière information utile concerne la couverture réseau. DRYAD définit cette couverture comme suit : après avoir placé tous les capteurs selon les règles mentionnées ci-dessus, on place alors les Border et les Mesh Gateways, et la couverture réseau est alors déterminée par l'ensemble des capteurs couverts par les Mesh Gateways placés. Le seuil d'acceptabilité pour DRYAD est placé à 95%.

Pour la simulation, nous définissons une forêt hexagonale avec une route qui encercle cette forêt. La forêt hexagonale est inscrite dans un cercle de rayon de trois kilomètres. Pour visualiser

les effets de la route, la simulation considère qu'elle fait 60 mètres de large. Ce n'est pas réaliste mais cela représente la zone sensible aux activités humaines.

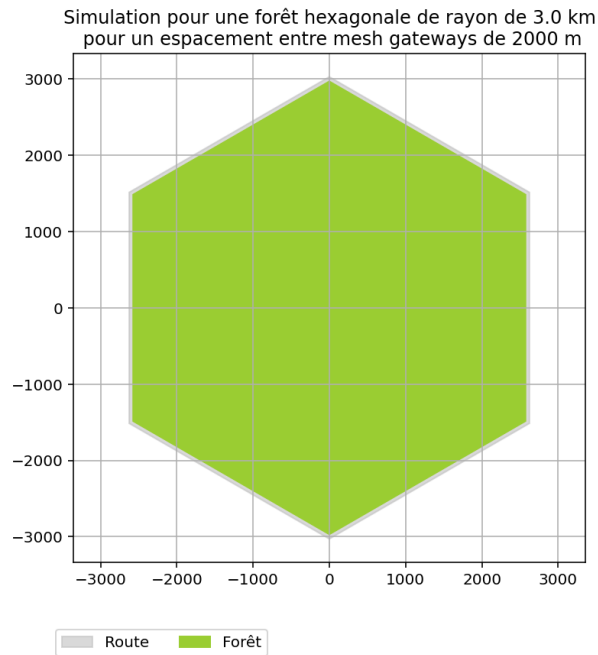


FIGURE 4.1 – Forêt théorique inscrite dans un cercle de rayon de 3 km utilisée pour les simulations

4.2 Simulation d'un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD

La première étape consiste à placer les capteurs selon les différentes densités requises (figure 4.2).

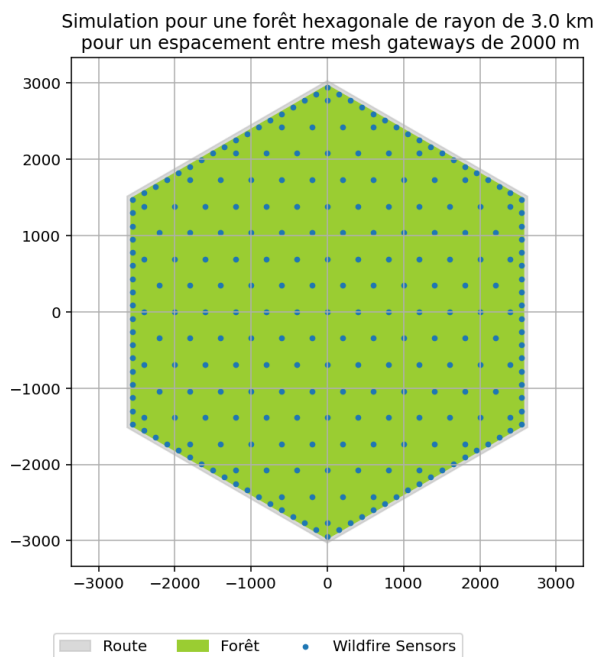


FIGURE 4.2 – Simulation sous conditions de DRYAD - Placement des capteurs

On va ensuite placer les Mesh Gateways (figure 4.3a). Ceux-ci sont agencés selon un quadrillage hexagonal en plaçant la première passerelle au centre de la forêt (figure 4.3b). Si le quadrillage en hexagone permet de placer les passerelles à des endroits judicieux sans qu'il y ait de trous d'influence au milieu de la forêt (zone non couverte par les passerelles), les vraies limites de l'influence de la connexion d'un Mesh Gateway vers un capteur sont circulaires (figure 4.3c).

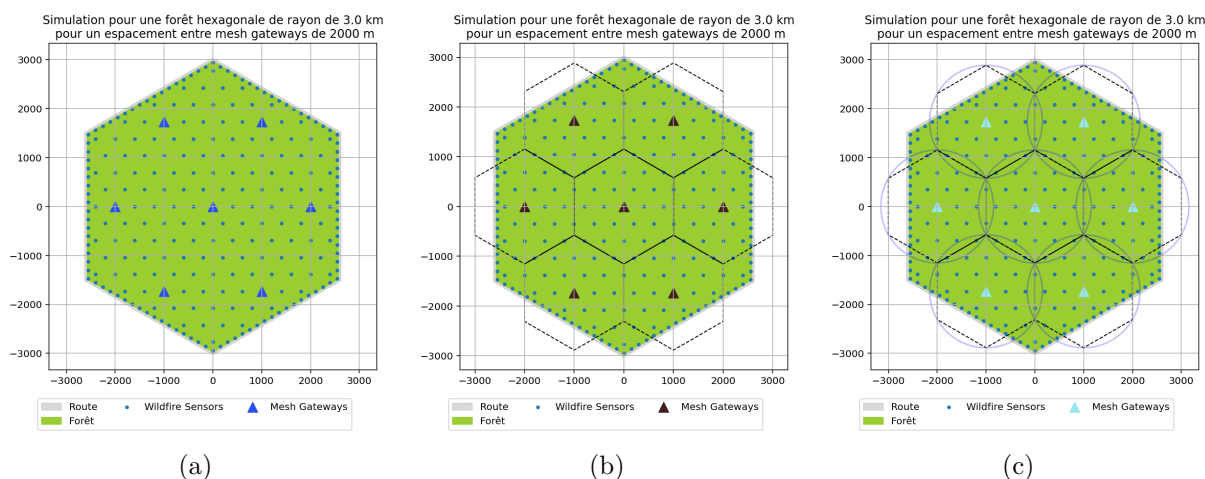


FIGURE 4.3 – Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Placement des passerelles maillées

Enfin, on place les Border Gateways en lisière de forêt dans le nombre requis par les ratios. Sur le graphe, un trait en pointillé montre la connexion directe entre la passerelle frontière et les passerelles maillées à moins de deux kilomètres.

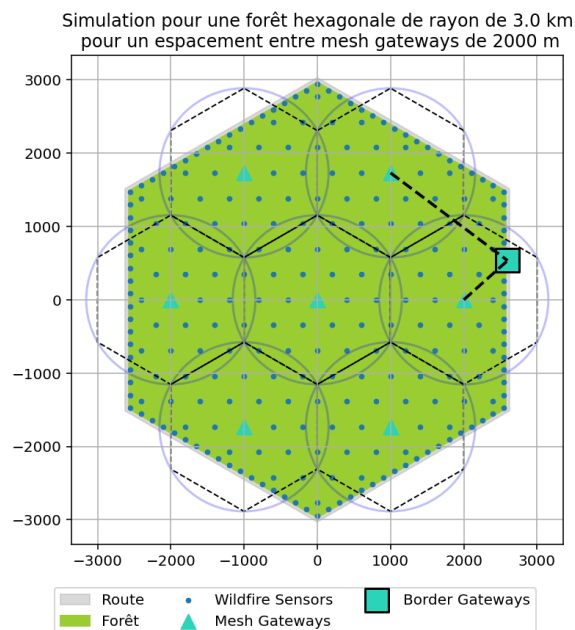


FIGURE 4.4 – Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Placement des passerelles frontières

Une fois les placements effectués, on peut regarder quels capteurs se trouvent dans la zone d'influence des passerelles maillées et lesquels ne le sont pas. Ces derniers figurent en rouge sur la figure 4.5.

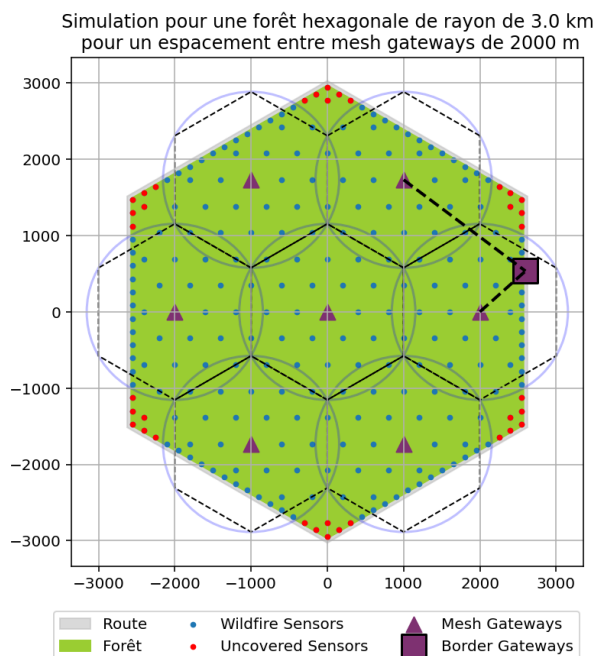


FIGURE 4.5 – Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Repérage des capteurs non couverts par les passerelles maillées

Si on veut observer la zone couverte effectivement par les capteurs qui ont un rayon de détection de 100m, on peut regarder la figure 4.6 où les zones de détection sont représentées en orange pâle.

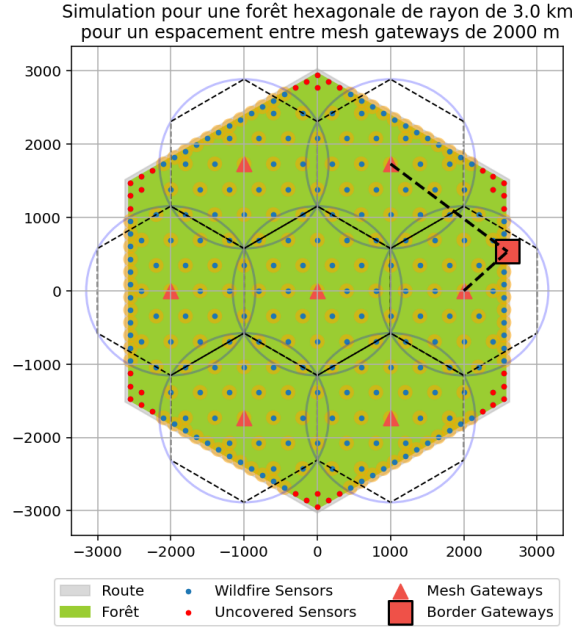


FIGURE 4.6 – Simulation selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Illustration de la zone de couverture des capteurs

Nous pouvons sortir plusieurs métriques de ce graphe.

Tout d'abord, le taux de capteurs couverts par les passerelles maillées (la couverture réseau définie par DRYAD). Ces capteurs qui ne sont repris par aucune zone d'influence de Mesh Gateway sont marqués en rouge sur le graphe. On calcule alors simplement les taux de capteurs couverts comme ceci :

$$\text{Taux de capteurs couverts} = \frac{N - N_{red}}{N} \quad (4.1)$$

avec N le nombre total de capteurs et N_{red} le nombre de capteurs non couverts, marqués en rouge sur le graphe.

Ensuite, on a la surface couverte par les mesh gateways qui nous indique quel pourcentage de la forêt peut être surveillé si on y mettait des capteurs. Le taux de surface couverte est défini par :

$$\text{Taux de surface couverte} = \frac{S_{mesh}}{S_{tot}} \quad (4.2)$$

avec S_{mesh} la surface couverte par l'ensemble des Mesh Gateways et S_{tot} la surface totale de la forêt. La surface S_{mesh} est calculée selon une méthode de Monte-Carlo à 100 000 points. Les points initiaux sont calibrés sur la taille de la forêt entière et les points finaux sont uniquement ceux qui se trouvent dans la zone circulaire d'influence d'une passerelle maillée.

Enfin, une troisième métrique permet d'estimer la fraction de la forêt effectivement surveillée par les capteurs connectés au réseau. Contrairement au taux de capteurs couverts, cette grandeur tient compte de la surface géographique associée à leur rayon de détection.

Seuls les capteurs situés à portée d'au moins une Mesh Gateway sont pris en considération. En effet, un capteur qui détecterait un départ de feu mais ne disposerait d'aucune liaison avec le réseau ne pourrait pas transmettre l'alerte et ne contribue donc pas à la surface effectivement surveillée.

Le calcul de cette surface doit également tenir compte du chevauchement entre les zones de détection des différents capteurs. Lorsque deux capteurs sont suffisamment proches, leurs

disques de détection peuvent se superposer partiellement. Additionner directement les surfaces individuelles conduirait alors à compter plusieurs fois certaines régions de la forêt.

Pour éviter ce problème, le taux de surface surveillée est estimé par une méthode de Monte-Carlo similaire à celle utilisée pour le calcul de la couverture surfacique des Mesh Gateways. Un grand nombre de points sont générés aléatoirement dans le rectangle englobant la forêt, puis seuls les points situés à l'intérieur de l'hexagone représentant la zone forestière sont conservés. Pour chacun de ces points, la distance au capteur connecté le plus proche est calculée. Le point est considéré comme surveillé si cette distance est inférieure ou égale au rayon de détection R_{sensor} , fixé ici à 100 m.

Le taux de surface surveillée est ainsi estimé par :

$$\text{Taux de surface surveillée} = \frac{N_{\text{points surveillés}}}{N_{\text{points dans la forêt}}}, \quad (4.3)$$

où $N_{\text{points dans la forêt}}$ désigne le nombre total de points de Monte-Carlo situés à l'intérieur de la zone forestière et $N_{\text{points surveillés}}$ le nombre de ces points qui se trouvent dans la zone de détection d'au moins un capteur connecté.

Cette méthode revient à estimer la surface de l'union des zones de détection des capteurs connectés, limitée à la surface de la forêt. Une région couverte simultanément par plusieurs capteurs n'est donc comptabilisée qu'une seule fois. De la même manière, la portion éventuelle d'une zone de détection située à l'extérieur de la forêt n'intervient pas dans le calcul.

Pour ce cas simulé selon un scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD, nous obtenons les chiffres suivants :

Nombre de capteurs	259
Nombre de passerelles maillées	7
Nombre de passerelles frontières	1
Taux de capteurs couverts	86.10 %
Taux de surface couverte	93.02 %
Taux de surface surveillée	27.29 %
Distance max. capteur - passerelle maillée	1571.62 m
Distance moyenne capteur - passerelle maillée	816.14 m
Nombre max. de capteurs pour une passerelle maillée	43
Nombre min. de capteurs pour une passerelle maillée	22

TABLE 4.1 – Simulation du scénario simplifié inspiré des recommandations DRYAD - Résultats

Cette table de résultats nous apprend deux choses importantes sur l'algorithme utilisé. Le taux de capteurs couverts et le taux de surface couverte sont différents. Cela s'explique du fait que la densité de capteurs n'est pas similaire sur toute la forêt puisqu'une route borde l'entière de la forêt. Le taux de capteurs couverts est sous les 95% demandés par DRYAD. Il faudrait donc soit repositionner les passerelles maillées pour cibler principalement les zones plus denses en terme de capteurs soit ajouter des passerelles maillées aux zones oubliées par l'algorithme actuel.

4.3 Simulation sous contraintes de portée d'une connexion BLE Coded PHY entre smartphones

La section 3.4 nous apprend qu'une connexion BLE Coded PHY entre deux smartphones en milieu libre peut atteindre 475 m en milieu ouvert et 240 m en milieu forestier. La transposition directe des portées mesurées pour une connexion BLE Coded PHY au cas de la forêt simulée constitue volontairement une hypothèse favorable. Dans cette simulation, la distance maximale entre deux smartphones est utilisée comme contrainte de placement des passerelles maillées. Autrement dit, les smartphones ne sont plus espacés de 2 km, comme dans le cas de référence inspiré des spécifications DRYAD, mais de 475 m dans le cas le plus favorable et de 240 m dans le cas forestier. Cette hypothèse permet d'évaluer l'ordre de grandeur du nombre de téléphones nécessaires si l'on souhaite conserver une topologie maillée continue malgré la portée plus faible du BLE.

Les résultats du cas idéal en milieu libre sont repris à la figure 4.7 et dans la table 4.2

Nombre de capteurs	259
Nombre de passerelles maillées	133
Nombre de passerelles frontières	7
Taux de capteurs couverts	100.00 %
Taux de surface couverte	100.00 %
Taux de surface surveillée	30.71 %
Distance max. capteur - passerelle maillée	261.01 m
Distance moyenne capteur - passerelle maillée	165.30 m
Nombre max. de capteurs pour une passerelle maillée	4
Nombre min. de capteurs pour une passerelle maillée	1

TABLE 4.2 – Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en espace libre) - Résultats

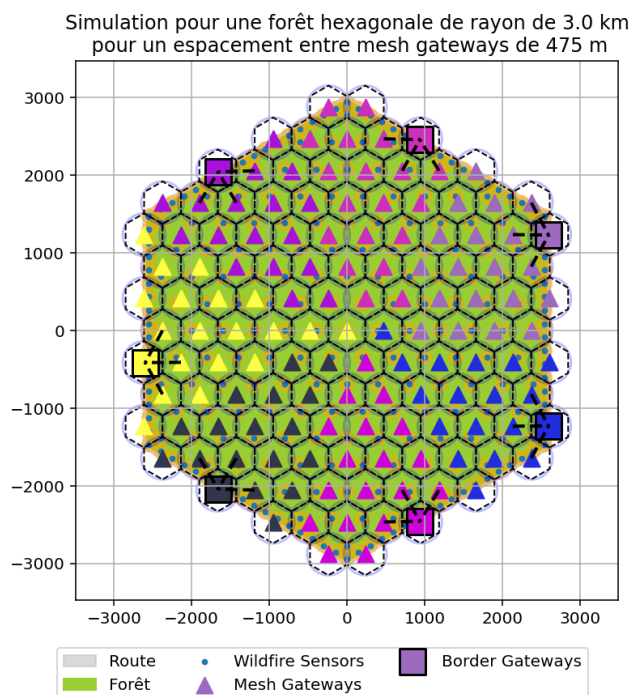


FIGURE 4.7 – Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en espace libre) - Illustration

Les résultats acquis par la limite de connexion pour une connexion **BLE** Coded **PHY** en forêt sont repris à la figure 4.8 et à la table 4.3.

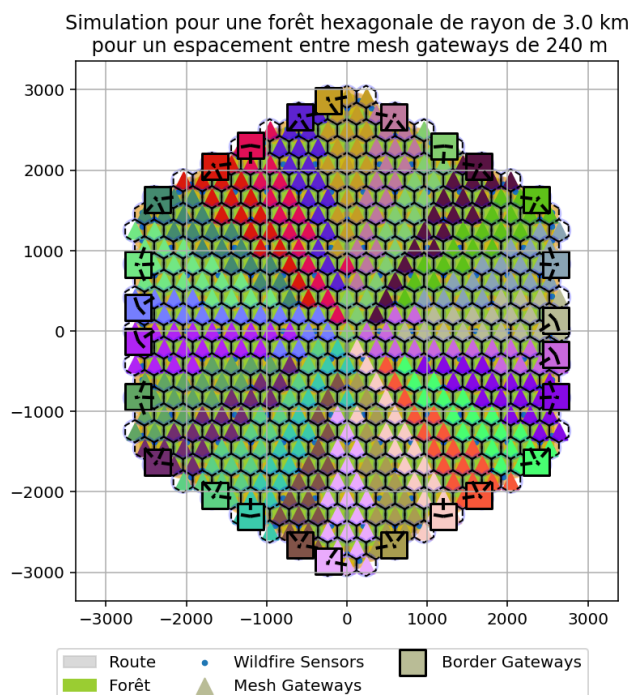


FIGURE 4.8 – Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en forêt) - Illustration

Nombre de capteurs	259
Nombre de passerelles maillées	505
Nombre de passerelles frontières	26
Taux de capteurs couverts	100.00 %
Taux de surface couverte	100.00 %
Taux de surface surveillée	30.67 %
Distance max. capteur - passerelle maillée	138.56 m
Distance moyenne capteur - passerelle maillée	85.47 m
Nombre max. de capteurs pour une passerelle maillée	2
Nombre min. de capteurs pour une passerelle maillée	0

TABLE 4.3 – Simulation sous limite de connexion BLE Coded PHY (en forêt) - Résultats

Un point essentiel est que le nombre de nœuds nécessaires ne varie pas linéairement avec la portée radio, mais approximativement avec l'inverse du carré de cette portée. En effet, dans un placement régulier sur une surface donnée, si l'on divise la distance entre deux nœuds par un facteur donné, le nombre de nœuds nécessaires augmente approximativement selon le carré de ce facteur. Ainsi, passer d'un espacement de 2000 m entre Mesh Gateways à un espacement de 475 m revient à réduire la distance d'un facteur d'environ 4,2. Le nombre de nœuds attendus augmente donc d'un facteur voisin de $(4.2)^2$, soit environ 18. Cela correspond bien à l'ordre de grandeur obtenu dans la simulation, où le nombre de passerelles maillées passe de 7 à 133, soit un facteur 19.

Le même raisonnement explique le résultat obtenu en milieu forestier. Dans ce cas, la portée prise en compte est de 240 m. Par rapport au cas DRYAD à 2000 m, la distance entre deux nœuds est réduite d'un facteur d'environ 8,3. Le nombre de nœuds nécessaires augmente donc approximativement d'un facteur $(8.3)^2$, soit environ 69. La simulation donne 505 passerelles

maillées au lieu de 7, ce qui correspond à un facteur d'environ 72. L'écart entre l'estimation théorique et le résultat simulé provient principalement des effets de bord de la forêt hexagonale et du fait que le placement est discret, imposé par un quadrillage hexagonal.

Ce résultat montre que la portée radio est un paramètre extrêmement sensible dans le dimensionnement du réseau. Une diminution de portée qui peut sembler modérée à l'échelle d'une liaison individuelle se traduit, à l'échelle d'un réseau couvrant une surface forestière complète, par une augmentation massive du nombre de nœuds. La portée de 240 m obtenue en forêt est donc particulièrement pénalisante, car elle impose un maillage très dense pour maintenir la connectivité entre smartphones.

Il est également important de noter que les taux de couverture de 100 % obtenus dans les deux simulations **BLE** ne doivent pas être interprétés comme une validation de la solution. Ils indiquent uniquement que, avec un nombre très élevé de téléphones, il est effectivement possible de couvrir l'ensemble des capteurs et de la surface considérée. Cependant, cette couverture est obtenue au prix d'une multiplication importante du nombre d'équipements. Dans le cas en espace libre, 133 téléphones sont nécessaires pour couvrir une forêt qui ne demandait que 7 Mesh Gateways dans le scénario de référence. Dans le cas forestier, 505 téléphones sont nécessaires, soit presque deux fois plus de téléphones que de capteurs Wildfire, puisqu'il n'y a que 259 capteurs dans la simulation.

Ce dernier point est particulièrement important. Dans le scénario forestier, le réseau contient davantage de smartphones que de capteurs à connecter. Cela signifie qu'une grande partie des téléphones ne joue pas le rôle d'interface directe avec les capteurs, mais sert uniquement de relais pour assurer la continuité du réseau maillé. Ces téléphones relais contribuent donc à l'augmentation du nombre d'appareils, de la complexité de déploiement et potentiellement de l'impact environnemental, sans augmenter directement la capacité de détection incendie du système.

La comparaison du nombre moyen de capteurs associés à chaque passerelle illustre aussi cette perte d'efficacité. Dans le cas DRYAD, les 259 capteurs sont associés à seulement 7 Mesh Gateways, soit en moyenne environ 37 capteurs par passerelle. Dans le cas **BLE** en espace libre, cette moyenne tombe à environ 2 capteurs par téléphone. Dans le cas **BLE** forestier, elle devient inférieure à 1 capteur par téléphone. Cela signifie que le réseau est alors dimensionné non plus par le nombre de capteurs à collecter, mais par la nécessité de maintenir des liaisons courtes entre smartphones.

Cette densification du réseau a aussi un impact sur le nombre de Border Gateways. Dans le cas de référence, une seule passerelle frontière suffit. Avec une portée BLE de 475 m, le nombre de passerelles frontières passe à 7. Avec une portée de 240 m, il atteint 26. Or, les Border Gateways sont les éléments qui assurent la connexion entre le réseau local et l'extérieur. Leur multiplication augmente donc la complexité du système global, notamment en matière d'alimentation, de connectivité externe, de maintenance et de coût environnemental. Même si les smartphones reconditionnés peuvent présenter un avantage en matière de réemploi, cet avantage risque d'être annulé si leur nombre devient trop important.

Il faut également préciser que cette simulation reste optimiste. Les distances de 475 m et 240 m sont considérées ici comme des seuils de connexion fixes. En pratique, une liaison radio ne disparaît pas brutalement au-delà d'une distance donnée : sa qualité dépend du niveau de signal reçu, du bruit, de l'orientation des antennes, de la hauteur d'installation, de l'humidité, de la végétation, des obstacles, de la météo et du niveau de batterie. Dans le cas de smartphones, l'antenne BLE est intégrée dans le châssis et n'est pas conçue pour former une infrastructure fixe longue portée. L'orientation du téléphone, la présence d'un boîtier de protection, la proximité du sol ou d'un tronc d'arbre peuvent donc fortement modifier la qualité de la liaison. La simulation ne tient pas non plus compte des pertes de paquets, des retransmissions, de la latence multi-sauts

ou de la consommation énergétique liée au maintien d'un réseau maillé permanent.

Il faut donc interpréter les résultats comme une borne favorable plutôt que comme une estimation réaliste de déploiement. Si la solution semble déjà peu viable avec ces hypothèses simplifiées, elle le serait probablement encore moins dans un environnement forestier réel, soumis à des variations temporelles et spatiales importantes. En particulier, le cas à 240 m montre que le **BLE** Coded **PHY**, bien qu'intéressant pour augmenter la portée d'une liaison Bluetooth classique, reste insuffisant pour remplacer directement les liaisons longue portée utilisées par les Mesh Gateways de DRYAD.

Ces résultats n'excluent pas totalement l'utilisation de smartphones reconditionnés dans une architecture de détection incendie, mais ils suggèrent que leur rôle devrait être repensé. Une première piste serait de ne pas utiliser les smartphones uniquement comme relais de télécommunication, mais de les transformer en nœuds hybrides capables à la fois de relayer les messages et de contribuer directement à la détection, de greffer à ces smartphones les capteurs utilisés par les Wildfire Sensor. Dans ce cas, la forte densité imposée par le BLE pourrait être partiellement valorisée par une fonction de mesure locale. Le taux de surface surveillée passerait alors d'environ 30 % à plus de 63 %. Une deuxième piste serait d'utiliser le **BLE** seulement pour des communications locales ou opportunistes, tout en conservant une technologie plus longue portée pour les liaisons principales.

En conclusion, la simulation montre que le remplacement direct des Mesh Gateways DRYAD par des smartphones communiquant uniquement en **BLE** Coded **PHY** n'est pas réaliste dans la configuration étudiée. La portée insuffisante du **BLE** impose une densification très importante du réseau. Cette densification permet certes d'atteindre une couverture complète, mais au prix d'un nombre d'équipements incompatible avec l'objectif initial de réduction d'impact environnemental. Le **BLE** Coded **PHY** apparaît donc davantage comme une technologie intéressante pour des communications locales entre appareils proches que comme une solution adaptée à la construction d'un réseau maillé forestier longue portée.

4.4 Étude paramétrique de la portée d'une connexion BLE Coded PHY entre smartphones

Afin de mieux comprendre l'effet de la portée radio sur le dimensionnement du réseau, une analyse paramétrique a également été réalisée. Dans cette analyse, la distance entre deux passerelles maillées est progressivement réduite, tandis que le nombre de nœuds nécessaires est recalculé pour différentes tailles de forêt. Cette approche permet de situer les deux cas **BLE** Coded **PHY** étudiés précédemment, à savoir une portée de 475 m en espace libre et une portée de 240 m en milieu forestier.

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 permettent d'analyser l'influence de la distance entre deux Mesh Gateways sur le nombre d'équipements nécessaires au déploiement du réseau. Cette analyse est réalisée pour trois tailles de forêt hexagonale, de rayons respectifs 3 km, 7 km et 20 km. Elle complète les simulations précédentes en ne se limitant plus à un seul cas d'étude, mais en observant l'évolution du réseau lorsque la portée entre deux passerelles varie.

Pour une parcelle de forêt hexagonale de Rx km encadrée par une route, combien faut-il de mesh gateways ?

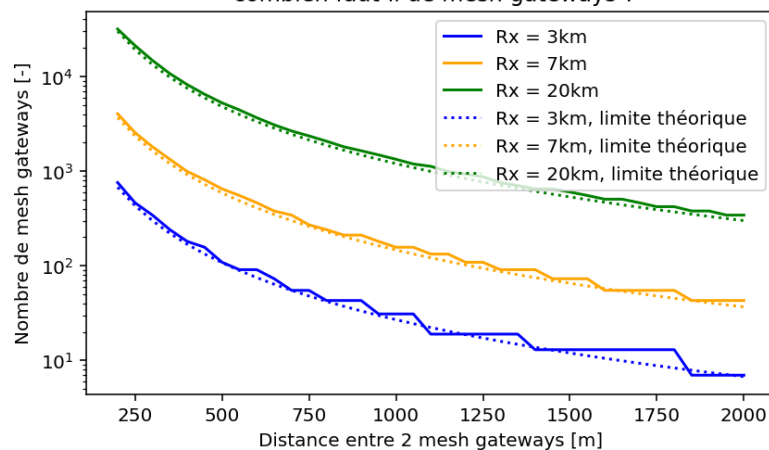


FIGURE 4.9 – Évolution du nombre de passerelles maillées nécessaires selon la distance entre deux passerelles, pour différentes tailles de forêt.

Pour une parcelle de forêt hexagonale de Rx km encadrée par une route, combien faut-il de border gateways ?

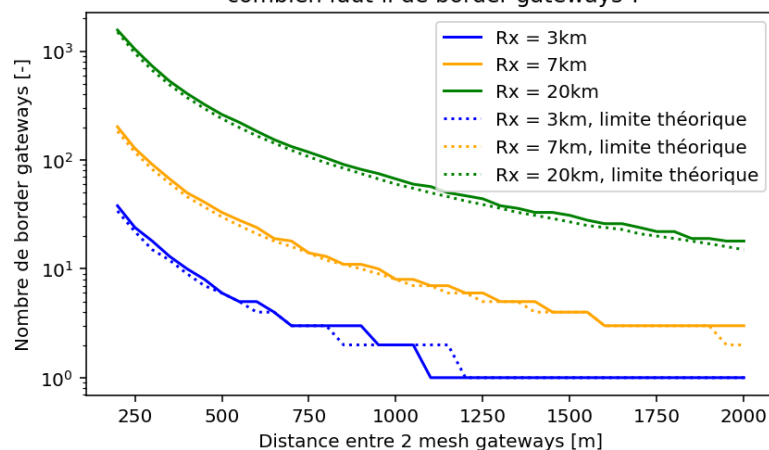
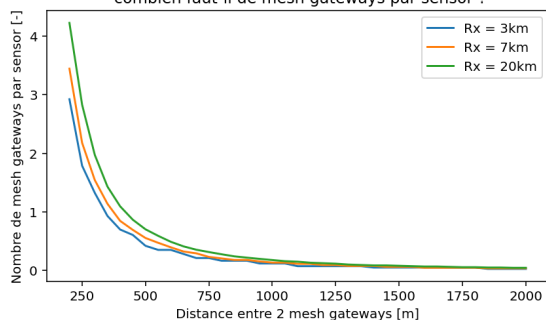


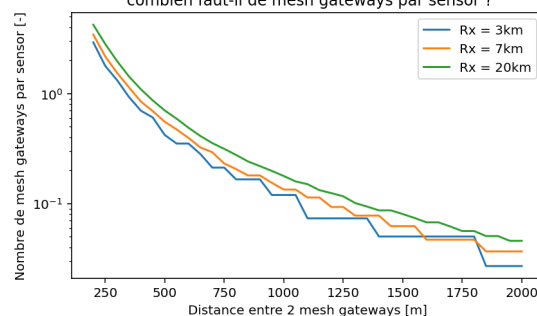
FIGURE 4.10 – Évolution du nombre de passerelles frontières nécessaires selon la distance entre deux passerelles, pour différentes tailles de forêt.

Pour une parcelle de forêt hexagonale de Rx km encadrée par une route, combien faut-il de mesh gateways par sensor ?



(a)

Pour une parcelle de forêt hexagonale de Rx km encadrée par une route, combien faut-il de mesh gateways par sensor ?



(b)

FIGURE 4.11 – Nombre de Mesh Gateways par capteur selon la distance entre deux passerelles maillées

La figure 4.9 montre que le nombre de Mesh Gateways nécessaires diminue fortement lorsque la distance entre deux passerelles augmente. Cette tendance est attendue, car chaque passerelle couvre une surface plus importante lorsque la distance inter-passerelles augmente. Inversement, lorsque la portée radio diminue, le nombre de passerelles à placer augmente très rapidement. Ce comportement n'est pas linéaire : pour une surface donnée, le nombre de nœuds nécessaires varie approximativement avec l'inverse du carré de la distance entre deux passerelles. Ainsi, une réduction par deux de la distance entre passerelles peut conduire à une multiplication par environ quatre du nombre de passerelles nécessaires.

Les courbes en pointillés représentent une limite théorique obtenue à partir d'un raisonnement surfacique. On remarque que les résultats simulés suivent globalement cette limite, ce qui indique que l'algorithme de placement produit un nombre de passerelles cohérent avec l'ordre de grandeur attendu. Les écarts entre les courbes simulées et les limites théoriques s'expliquent principalement par les effets de bord de la forêt hexagonale, par la discrétisation du placement sur un quadrillage et par le fait qu'il n'est pas toujours possible de remplir parfaitement la surface avec des cellules régulières. Ces effets sont particulièrement visibles pour les petites forêts, où les bords représentent une part plus importante de la surface totale.

La figure 4.10 présente l'évolution du nombre de Border Gateways nécessaires. Cette courbe suit logiquement la même tendance que celle du nombre de Mesh Gateways. En effet, dans le modèle utilisé, une Border Gateway peut prendre en charge un maximum de 20 Mesh Gateways, conformément au ratio utilisé dans les conditions de simulation. Le nombre de Border Gateways est donc directement lié au nombre total de Mesh Gateways à connecter. Lorsque la distance entre Mesh Gateways diminue, le nombre de Mesh Gateways augmente, et le nombre de Border Gateways augmente à son tour. Les courbes prennent une forme en paliers, car le nombre de Border Gateways est un entier obtenu par arrondissement au supérieur du rapport entre le nombre de Mesh Gateways et la limite de 20 Mesh Gateways par Border Gateway.

La figure 4.11 permet de mettre en évidence l'efficacité du déploiement en rapportant le nombre de Mesh Gateways au nombre de capteurs. Cette métrique est particulièrement intéressante dans le cadre de ce travail, car l'objectif n'est pas seulement de couvrir la forêt, mais aussi de limiter le nombre d'équipements nécessaires. Lorsque la distance entre Mesh Gateways est faible, le nombre de passerelles par capteur devient élevé. Dans ce cas, une partie importante des passerelles ne sert plus principalement à connecter des capteurs, mais à assurer la continuité du réseau maillé. Le réseau est alors dimensionné par la contrainte de connectivité entre passerelles plutôt que par le nombre de capteurs à desservir.

Cette observation est importante pour l'évaluation d'une solution basée sur des smartphones. Si la portée entre deux smartphones est limitée, comme dans le cas d'une connexion BLE Coded PHY, le nombre de téléphones nécessaires augmente fortement. La solution peut alors atteindre une bonne couverture réseau, mais au prix d'une densité très importante de nœuds relais. Dans les cas les plus défavorables, le nombre de smartphones peut même devenir du même ordre de grandeur que le nombre de capteurs à connecter, voire supérieur. Une telle situation réduit fortement l'intérêt pratique et environnemental du remplacement des Mesh Gateways par des smartphones reconditionnés.

Ces trois graphes montrent donc que la portée radio est un paramètre déterminant dans le dimensionnement du réseau. Une technologie de communication à courte portée peut permettre d'obtenir une couverture complète, mais uniquement en multipliant fortement le nombre de nœuds. Dans le cadre de ce travail, cette conclusion est essentielle : le BLE Coded PHY peut être intéressant pour des communications locales entre smartphones, mais sa portée semble insuffisante pour remplacer directement les Mesh Gateways d'un réseau forestier maillé longue portée.

Conclusion

Ce travail avait pour objectif d'évaluer la possibilité de réutiliser des smartphones comme passerelles maillées dans un réseau de détection précoce des incendies de forêt, en prenant comme référence l'architecture Silvanet développée par DRYAD. L'idée initiale repose sur le constat qu'un smartphone devenu obsolète pour son usage premier conserve néanmoins des capacités de calcul et plusieurs interfaces de communication sans fil potentiellement exploitables. Sa réutilisation pourrait ainsi prolonger sa durée de vie et éviter la fabrication d'un nouvel équipement dédié. Il restait cependant à déterminer si les technologies radio disponibles nativement sur un smartphone permettent effectivement de répondre aux contraintes particulières d'un réseau maillé déployé en environnement forestier.

L'étude du système Silvanet a tout d'abord permis d'identifier les principales contraintes auxquelles devrait répondre une telle substitution. Le réseau développé par DRYAD repose sur une architecture dans laquelle des Wildfire Sensors transmettent leurs informations vers des Mesh Gateways, qui les relaient ensuite de proche en proche jusqu'à une Border Gateway assurant la connexion avec le réseau extérieur. Cette architecture permet de conserver la faible consommation et la simplicité des capteurs **LoRaWAN**, tout en reportant les fonctions de maillage sur l'infrastructure. Le remplacement envisagé dans ce travail concerne donc principalement cette fonction de relais assurée par les Mesh Gateways.

Plusieurs technologies de communication disponibles sur smartphone ont ensuite été étudiées. **LoRa** et Wi-Fi HaLow présentent des caractéristiques de propagation particulièrement intéressantes pour un environnement forestier, mais nécessitent un matériel radio qui n'est pas intégré aux smartphones conventionnels. Les réseaux **LTE** et 5G offrent, quant à eux, une connectivité longue distance, mais restent principalement dépendants d'une infrastructure opérateur et sont davantage adaptés à une liaison de retour vers Internet qu'à la création d'un réseau maillé local autonome. Le Wi-Fi conventionnel constitue une solution techniquement envisageable, mais son débit élevé dépasse largement les besoins du système étudié, tandis que sa consommation et ses caractéristiques de propagation sont moins favorables à l'application considérée. Au terme de cette comparaison, Bluetooth Low Energy, et plus particulièrement **BLE** 5 Coded **PHY**, a été retenu comme le candidat présentant le meilleur compromis entre disponibilité native sur smartphone, consommation, accessibilité depuis Android et amélioration de la portée. Ce choix constituait toutefois un candidat à évaluer expérimentalement et non une validation préalable de son adéquation au réseau Silvanet.

Les essais réalisés entre deux Google Pixel 6 ont permis de caractériser concrètement les performances de cette technologie. Parmi les quatre **PHY** étudiées, LE Coded S=8 a fourni la plus grande portée, avec une connexion maintenue jusqu'à 475 m dans l'environnement relativement dégagé du RAVeL et jusqu'à 240 m dans le bois de Presgaux. La végétation réduit ainsi sensiblement les distances atteignables, même si la forêt utilisée pour les essais était principalement constituée de grands arbres espacés et comportait relativement peu de végétation basse. Ces résultats montrent également que les performances réelles du Pixel 6 dépassent sensiblement les exigences minimales fixées par la spécification Bluetooth : la connexion LE Coded S=8 peut encore être maintenue alors que la marge calculée à partir de la sensibilité normative est déjà

devenue négative. Cette dernière doit donc être interprétée comme un indicateur conservateur de robustesse et non comme un seuil déterministe de perte de connexion.

La confrontation des mesures avec différents modèles de propagation a par ailleurs mis en évidence les limites d'une prédiction fondée uniquement sur des modèles génériques de végétation. Même le modèle FITU-R sans feuilles, qui présente le meilleur accord parmi ceux étudiés, conserve une erreur quadratique moyenne d'environ 13,8 dB vis-à-vis des observations réalisées dans le bois de Presgaux. À l'inverse, un modèle log-distance directement calibré sur les mesures forestières reproduit l'évolution moyenne du **RSSI** avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,98 et des **RMSE** inférieures à 2 dB. Cette différence souligne l'importance de caractériser expérimentalement le milieu lorsqu'un dimensionnement précis est recherché. Malgré la portée d'environ 288 m suggérée par l'extrapolation du modèle calibré pour LE Coded S=8, la valeur réellement mesurée de 240 m a donc été retenue pour le dimensionnement du réseau, afin de rester fondé sur une performance effectivement observée.

Le passage de l'échelle d'une liaison à celle d'un réseau forestier complet modifie cependant fortement l'interprétation de ces résultats. Dans le cas d'étude considéré, une portée inter-passerelles de 475 m nécessite déjà 133 smartphones, tandis que l'utilisation de la portée forestière de 240 m porte ce nombre à 505 smartphones pour seulement 259 capteurs. Cette augmentation s'explique par le caractère essentiellement surfacique du problème : le nombre de nœuds nécessaires évolue approximativement avec l'inverse du carré de leur espacement. Une diminution relativement limitée de la portée d'une liaison individuelle peut donc provoquer une très forte augmentation du nombre d'équipements nécessaires lorsqu'elle est appliquée à l'ensemble d'un réseau. L'étude paramétrique confirme cette tendance pour plusieurs dimensions de forêt.

Ces résultats permettent finalement de répondre à la question centrale de ce travail. Le **BLE** 5 Coded **PHY** permet effectivement d'établir des communications de plusieurs centaines de mètres entre smartphones et constitue une amélioration significative de la portée offerte par Bluetooth. Il ne paraît cependant pas adapté au remplacement direct des Mesh Gateways de DRYAD dans un réseau forestier maillé longue portée. La densification nécessaire pour compenser sa portée réduite conduit à un nombre de smartphones disproportionné par rapport au nombre de capteurs à desservir. Une couverture complète du réseau peut donc être obtenue dans la simulation, mais cette couverture ne suffit pas à garantir la pertinence de la solution : la quantité d'équipements, la complexité du déploiement et les besoins associés risquent d'annuler l'intérêt recherché par la réutilisation de matériel existant.

Cette conclusion n'exclut toutefois pas l'utilisation de smartphones reconditionnés dans une future architecture de détection des incendies. Elle suggère plutôt que leur rôle doit être différent de celui d'un simple remplacement un-pour-un des Mesh Gateways. Le **BLE** Coded **PHY** pourrait notamment être utilisé pour des communications locales ou pour constituer des sous-réseaux de faible étendue, tandis qu'une technologie plus longue portée assurerait les liaisons principales. Une autre piste consisterait à valoriser la densité des smartphones en leur ajoutant une fonction de détection environnementale, de sorte qu'ils ne jouent plus uniquement le rôle de relais. Les travaux récents sur les communications hybrides, tels que BoRa, montrent également qu'il est physiquement possible de rapprocher les capacités de portée de **LoRa** et le matériel **BLE** existant, même si les accès bas niveau nécessaires ne sont actuellement pas disponibles au travers des interfaces Android conventionnelles. Enfin, une validation complète d'une architecture de ce type nécessiterait de réaliser un véritable réseau multi-sauts entre plusieurs smartphones, d'en étudier la consommation énergétique sur le long terme, d'évaluer l'interface avec les capteurs **LoRaWAN** existants et de répéter les campagnes radio dans des environnements forestiers présentant des densités de végétation et des conditions météorologiques différentes.

Ainsi, le résultat principal de ce travail n'est pas la démonstration qu'un smartphone peut simplement remplacer une Mesh Gateway existante, mais l'identification des conditions et des limites dans lesquelles sa réutilisation devient techniquement pertinente. Les expérimentations

montrent qu'un smartphone possède des capacités radio suffisamment intéressantes pour envisager de nouveaux usages dans des infrastructures **IoT** distribuées. Elles montrent également qu'une solution satisfaisante à l'échelle d'une liaison ne l'est pas nécessairement à l'échelle d'un réseau complet. C'est précisément cette transition entre performance radio individuelle et faisabilité du système qui constitue l'un des principaux enseignements de ce travail.

Références

- [1] Nancy HARRIS et Melissa ROSE. *World's Forest Carbon Sink Shrank to its Lowest Point in at Least 2 Decades, Due to Fires and Persistent Deforestation*. Juill. 2025. URL : <https://www.wri.org/insights/forest-carbon-sink-shrinking-fires-deforestation>. (accessed : 09.05.2026).
- [2] James MACCARTHY et al. *The Latest Data Confirms : Forest Fires Are Getting Worse*. Juill. 2025. URL : <https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires>. (accessed : 02.12.2025).
- [3] Rongbin XU et al. "Global, regional, and national mortality burden attributable to air pollution from landscape fires : a health impact assessment study". In : *The Lancet* 404.10470 (déc. 2024), p. 2447-2459. ISSN : 0140-6736. DOI : [10.1016/S0140-6736\(24\)02251-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)02251-7). URL : [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)02251-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)02251-7).
- [4] Ahmad A. A. ALKHATIB. "A Review on Forest Fire Detection Techniques". In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 10.3 (2014), p. 597368. DOI : [10.1155/2014/597368](https://doi.org/10.1155/2014/597368). eprint : <https://doi.org/10.1155/2014/597368>. URL : <https://doi.org/10.1155/2014/597368>.
- [5] Carsten BRINKSCHULTE. *DRYAD, connecting the natural world*. URL : <https://www.dryad.net/>. (accessed : 01.12.2025).
- [6] Aurélien BUXANT. *Comparative life-cycle assessment of supply strategies for forest-monitoring IoT sensor networks*. 2025. URL : <https://hdl.handle.net/2078.2/39001>.
- [7] BOSCH. *Gas Sensor BME688 - Datasheet*. URL : <https://www.bosch-sensortec.com/en/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme688#technical>. (accessed : 26.05.2026).
- [8] PowerTech SYSTEMS. *La sécurité des batteries Lithium-ion*. URL : <https://www.powertechsystems.eu/fr/technique/la-securite-des-batteries-lithium-ion/>. (accessed : 19.05.2026).
- [9] The Thing NETWORK. *Regional Parameters*. URL : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>. (accessed : 01.06.2026).
- [10] Marco BÖNIG, Daniel HOLLOS et Carsten BRINKSCHULTE. "LoRaWAN mesh gateway network and method for locating a forest fire". Patent US12614436B2 (United States). Dryad Networks GMBH. 9 août 2021. URL : <https://patents.google.com/patent/US12614436B2/en> (visité le 02/06/2026).
- [11] U.S. Fire ADMINISTRATION. *What is the WUI?* URL : <https://www.usfa.fema.gov/wui/what-is-the-wui/>. (accessed : 26.05.2026).
- [12] Marco BÖNIG, Daniel HOLLOS et Carsten BRINKSCHULTE. "LoRaWAN Gateway Network and Method". Patent Application US20230092573A1 (United States). Dryad Networks GMBH. 11 fév. 2021. URL : <https://patents.google.com/patent/US20230092573A1/en> (visité le 02/06/2026).
- [13] Robert STEWART et al. "Fractional-N Synthesized Chirp Generator". Patent US7791415B2 (United States). 7 sept. 2010. URL : <https://patents.google.com/patent/US7791415B2/en> (visité le 02/06/2026).
- [14] Radib KAR. *Aloha : A random access method of multiple access in Computer Network*. 5 mai 2023. URL : <https://www.includehelp.com/computer-networks/aloha-a-random-access-method-of-multiple-access.aspx>. (accessed : 01.06.2026).
- [15] Antonio CILFONE et al. "Wireless Mesh Networking : An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies". In : *Future Internet* 11.4 (2019), p. 99. DOI : [10.3390/fi11040099](https://doi.org/10.3390/fi11040099). URL : <https://doi.org/10.3390/fi11040099>.

- [16] Ming ZHAO et al. “Realization of Forest Internet of Things Using Wireless Network Communication Technology of Low-Power Wide-Area Network”. In : *Sensors* 23.10 (2023), p. 4809. DOI : [10.3390/s23104809](https://doi.org/10.3390/s23104809). URL : <https://doi.org/10.3390/s23104809>.
- [17] SEMTECH CORPORATION. *AN1200.22 : LoRa Modulation Basics*. Application Note AN1200.22. Revision 2. Semtech Corporation, mai 2015. URL : <https://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf> (visité le 16/06/2026).
- [18] WIKIPÉDIA. *LoRaWAN*. 2026. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/LoRaWAN> (visité le 16/06/2026).
- [19] THE THINGS NETWORK. *Spreading Factors*. 2024. URL : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> (visité le 19/06/2026).
- [20] LoRa Alliance Member THE THINGS NETWORK. *LoRaWAN Architecture*. URL : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>. (accessed : 19.06.2026).
- [21] DIGI INTERNATIONAL. *What Is LoRaWAN ?* Digi International. 2025. URL : <https://www.digi.com/solutions/by-technology/lorawan> (visité le 12/07/2026).
- [22] LORA ALLIANCE TECHNICAL COMMITTEE. *TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification*. Rapp. tech. TS001-1.0.4. LoRa Alliance, oct. 2020. URL : <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (visité le 12/07/2026).
- [23] SEMTECH CORPORATION. *LoRa® and LoRaWAN®*. Technical White Paper. Semtech Corporation, 2020. URL : <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/loraland-lorawan.pdf> (visité le 18/06/2026).
- [24] Daniel LUNDELL et al. “A Routing Protocol for LoRa Mesh Networks”. In : *Proceedings of the 2018 IEEE 19th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. 2018, p. 14-19.
- [25] Martin BOR, John VIDLER et Utz ROEDIG. “LoRa for the Internet of Things”. In : *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. 2016, p. 361-366.
- [26] João DIAS et António GRILO. “LoRaWAN Multi-Hop Uplink Extension”. In : *Procedia Computer Science*. T. 130. 2018, p. 424-431.
- [27] BLUETOOTH SIG. *Bluetooth Technology Overview*. Bluetooth Technology Website. Consulté le 12 juillet 2026. URL : <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>.
- [28] SILICON LABORATORIES. *Bluetooth LE Fundamentals*. Silicon Labs Developer Documentation, version 11.1.0. Consulté le 12 juillet 2026. 2026. URL : <https://docs.silabs.com/bluetooth/11.1.0/bluetooth-le-fundamentals/>.
- [29] BLUETOOTH SIG. *Bluetooth Core Specification Version 5.4, Volume 6, Part A : Radio Physical Layer Specification*. Bluetooth Core Specification 5.4. Spécification adoptée le 7 février 2023 ; consultée le 16 juin 2026. 2023. URL : <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/low-energy-controller/physical-layer-specification.html>.
- [30] Mario COLLOTTA et al. “Bluetooth 5 : A Concrete Step Forward toward the IoT”. In : *IEEE Communications Magazine* 56.7 (juill. 2018), p. 125-131. DOI : [10.1109/MCOM.2018.1700053](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700053). URL : <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700053>.
- [31] SILICON LABORATORIES. *Advertising and Scanning Fundamentals*. Silicon Labs Developer Documentation, version 11.1.0. Consulté le 12 juillet 2026. 2026. URL : <https://docs.silabs.com/bluetooth/11.1.0/bluetooth-fundamentals-advertising-scanning/>.

- [32] SILICON LABORATORIES. *Fundamentals—Connections*. Silicon Labs Developer Documentation, version 11.1.0. Consulté le 12 juillet 2026. 2026. URL : <https://docs.silabs.com/bluetooth/11.1.0/bluetooth-fundamentals-connections/>.
- [33] SILICON LABORATORIES. *GATT Server and Client Roles*. Silicon Labs Developer Documentation, version 11.1.0. Consulté le 12 juillet 2026. 2026. URL : <https://docs.silabs.com/bluetooth/11.1.0/bluetooth-gatt/gatt-server-client-roles>.
- [34] Michael SP"ORK, Carlo Alberto BOANO et Kay R"OMER. "Performance and Trade-offs of the New PHY Modes of BLE 5". In : *Proceedings of the 2019 ACM MobiHoc Workshop on Pervasive Systems in the IoT Era*. PERSIST-IoT '19. Catania, Italy : Association for Computing Machinery, 2019, p. 7-12. DOI : [10.1145/3331052.3332471](https://doi.org/10.1145/3331052.3332471). URL : <https://doi.org/10.1145/3331052.3332471>.
- [35] SILICON LABORATORIES. *Optimizing Current Consumption in Bluetooth Low Energy Devices*. Silicon Labs Developer Documentation, version 11.1.0. Consulté le 12 juillet 2026. 2026. URL : <https://docs.silabs.com/bluetooth/11.1.0/bluetooth-fundamentals-system-performance/current-consumption>.
- [36] BLUETOOTH SIG. *Bluetooth Core Specification Version 5.4, Volume 6, Part B : Link Layer Specification*. Bluetooth Core Specification 5.4. Spécification adoptée le 7 février 2023 ; consultée le 16 juin 2026. 2023. URL : <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/low-energy-controller/link-layer-specification.html>.
- [37] Martin WOOLLEY. *Exploring Bluetooth Core 5.0 : Going the Distance*. Bluetooth Technology Website. Consulté le 12 juillet 2026. Fév. 2017. URL : <https://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-going-the-distance/>.
- [38] MATHWORKS. *Bluetooth Packet Structure*. 2024. URL : <https://fr.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-packet-structure.html> (visité le 05/08/2026).
- [39] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Wi-Fi*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Consulté le 3 août 2026. 2026. URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>.
- [40] Paul KIRVAN et Lisa PHIFER. *Wi-Fi (802.11x Standard)*. TechTarget. Consulté le 3 août 2026. Nov. 2023. URL : <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/Wi-Fi>.
- [41] HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD. *What Is Wi-Fi ? What Is the Difference Between Wi-Fi and WLAN ?* Huawei IP Encyclopedia. Consulté le 3 août 2026. 2026. URL : <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/WiFi.html>.
- [42] IEEE. *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11 : Wireless Local Area Network (LAN) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Standard IEEE Std 802.11-2024. Publié le 28 avril 2025. Institute of Electrical et Electronics Engineers, 2024. URL : <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/10548/>.
- [43] Malia TOUMI et Sabrina YAKER. "Étude et mise en place d'un réseau WiFi outdoor". Mémoire de Master académique en télécommunication et réseaux. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du génie électrique et d'informatique, 2016.
- [44] IEEE. *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 2 : Enhancements for Extremely High Throughput (EHT)*. IEEE Standard IEEE Std 802.11be-2024. Publié le 22 juillet 2025. Institute of Electrical et Electronics Engineers, 2024. URL : <https://standards.ieee.org/ieee/802.11be/7516/>.

- [45] CISCO MERAKI. *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*. Documentation mise à jour le 6 juillet 2026, consultée le 3 août 2026. 2026. URL : https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_%28802.11be%29_Technical_Guide.
- [46] Karima BELHADJ et Amina ABID. “Étude et réalisation d’un réseau WiFi hotspot dans le service public”. Mémoire de fin d’études d’ingénieur d’État en électronique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de génie électrique et informatique, 2012.
- [47] Sébastien MAUDET et al. “Practical Evaluation of Wi-Fi HaLow Performance”. In : *Internet of Things* 24 (2023), p. 100957. DOI : [10.1016/j.iot.2023.100957](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100957).
- [48] Evgeny KHOROV et al. “A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs”. In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 21.1 (2019), p. 197-216. DOI : [10.1109/COMST.2018.2871099](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099).
- [49] Cailian DENG et al. “IEEE 802.11be Wi-Fi 7 : New Challenges and Opportunities”. In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.4 (2020), p. 2136-2166. DOI : [10.1109/COMST.2020.3012715](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3012715).
- [50] IEEE 802.11 WORKING GROUP. *Wireless Local Area Networks : Working Group Activities and Standards*. Consulté le 3 août 2026. 2026. URL : <https://www.ieee802.org/11/>.
- [51] IEEE. *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 2 : Sub 1 GHz License Exempt Operation*. IEEE Standard IEEE Std 802.11ah-2016. Publié le 5 mai 2017. Institute of Electrical et Electronics Engineers, 2016. URL : <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ah/4960/>.
- [52] Minyoung PARK. “IEEE 802.11ah : Sub-1-GHz License-Exempt Operation for the Internet of Things”. In : *IEEE Communications Magazine* 53.9 (2015), p. 145-151. DOI : [10.1109/MCOM.2015.7263359](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263359).
- [53] Le TIAN et al. “Wi-Fi HaLow for the Internet of Things : An Up-to-Date Survey on IEEE 802.11ah Research”. In : *Journal of Network and Computer Applications* 182 (2021), p. 103036. DOI : [10.1016/j.jnca.2021.103036](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103036).
- [54] Kevin SOOKOCHEFF. *How Does LTE Work ?* Consulté le 3 août 2026. Juill. 2019. URL : <https://sookocheff.com/post/networking/how-does-lte-work/>.
- [55] Harald REMMERT. *LTE Explained : What Is LTE, How LTE Works, and Why LTE Still Matters*. Consulté le 3 août 2026. Digi International, fév. 2026. URL : <https://www.digi.com/blog/post/what-is-lte>.
- [56] 3GPP. *5G System Overview*. Consulté le 3 août 2026. Août 2022. URL : <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>.
- [57] Claude E. SHANNON. “A Mathematical Theory of Communication”. In : *Bell System Technical Journal* 27.3 (1948), p. 379-423. DOI : [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [58] TUTORIALSPPOINT. *LTE Network Architecture*. Consulté le 3 août 2026. 2026. URL : https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm.
- [59] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ; Overall Description ; Stage 2*. Technical Specification 3GPP TS 36.300. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/36300.htm>.
- [60] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Physical Channels and Modulation*. Technical Specification 3GPP TS 36.211. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/36211.htm>.

- [61] Venkateshu KAMARTHI. *Understanding and Mitigating PAPR in OFDM Systems*. Juin 2025. URL : <https://www.nxgconnect.com/post/understanding-and-mitigating-papr-in-ofdm-systems>. (accessed : 04.08.2026).
- [62] Hyung G. MYUNG, Junsung LIM et David J. GOODMAN. “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission”. In : *IEEE Vehicular Technology Magazine* 1.3 (2006), p. 30-38. DOI : [10.1109/MVT.2006.307304](https://doi.org/10.1109/MVT.2006.307304).
- [63] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Multiplexing and Channel Coding*. Technical Specification 3GPP TS 36.212. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/36212.htm>.
- [64] Iryna ANDRIYANOVA. *Communications Numériques II – Cours 7*. Support de cours, ETIS, Université de Cergy-Pontoise. Consulté le 4 août 2026. 2013. URL : <https://perso.etis-lab.fr/andriyanova/documents/cours/cours7-ComNum2.pdf>.
- [65] WRAY CASTLE. *What is mMTC in 5G ?* 2024. URL : <https://wraycastle.com/fr/blogs/glossaire-des-termes-de-la-technologie-des-telecommunications/what-is-mmtc-in-5g> (visité le 04/08/2026).
- [66] 3GPP. *NR ; Physical Channels and Modulation*. Technical Specification 3GPP TS 38.211. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/38211.htm>.
- [67] Stefan PARKVALL et al. “NR : The New 5G Radio Access Technology”. In : *IEEE Communications Standards Magazine* 1.4 (2017), p. 24-30. DOI : [10.1109/MCOMSTD.2017.1700042](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700042).
- [68] Xingqin LIN et al. “5G New Radio : Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology”. In : *IEEE Communications Standards Magazine* 3.3 (2019), p. 30-37. DOI : [10.1109/MCOMSTD.001.1800036](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800036).
- [69] 3GPP. *NR ; Multiplexing and Channel Coding*. Technical Specification 3GPP TS 38.212. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/38212.htm>.
- [70] 3GPP. *NR ; NR and NG-RAN Overall Description ; Stage 2*. Technical Specification 3GPP TS 38.300. Version courante consultée le 3 août 2026. 3rd Generation Partnership Project. URL : <https://www.3gpp.org/dynareport/38300.htm>.
- [71] MOBILE PACKET CORE. *What Is an EPS Bearer in LTE ?* 2018. URL : <https://mobilepacketcore.com/eps-bearer-lte/> (visité le 05/08/2026).
- [72] POYNTING ANTENNAS. *Signal Strength Measure RSRP, RSRQ and SINR Reference for LTE & 5G Cheat Sheet*. Mai 2021. URL : <https://poynting.tech/fr/articles/antenna-faq/signal-strength-measure-rsrp-rsrq-and-sinr-reference-for-lte-cheat-sheet/> (visité le 04/08/2026).
- [73] Yeming LI et al. “BoRa : LoRa over BLE”. In : *Proceedings of the 31st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM MobiCom '25. Hong Kong, China : Association for Computing Machinery, 2025, p. 216-230. ISBN : 979-8-4007-1129-9. DOI : [10.1145/3680207.3723470](https://doi.org/10.1145/3680207.3723470).
- [74] Piotr GAWŁOWICZ, Anatolij ZUBOW et Falko DRESSLER. “Wi-Lo : Emulating LoRa Using COTS WiFi”. In : *arXiv preprint arXiv :2105.04998* (2021). arXiv : [2105.04998 \[cs.NI\]](https://arxiv.org/abs/2105.04998). URL : <https://arxiv.org/abs/2105.04998>.
- [75] Dan XIA et al. “WiRa : Enabling Cross-Technology Communication from WiFi to LoRa with IEEE 802.11ax”. In : *IEEE INFOCOM 2022 – IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2022, p. 430-439.

- [76] Agence Nationale des FRÉQUENCES (ANFR). *Les niveaux d'exposition*. Agence Nationale des Fréquences. 2018-01-26. URL : <https://www.radiofrquences.gouv.fr/les-niveaux-d-exposition-a73.html> (visité le 17/06/2026).
- [77] RFTOOLS.IO. *Guide de l'ingénieur sur les décibels : dB, dBm, dBi et dBW*. 2026-02-27. URL : <https://rftools.io/fr/blog/decibels-explained-db-dbm-dbi/> (visité le 16/06/2026).
- [78] MATHURANATHAN. *Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model*. 30 sept. 2013. URL : <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/30/log-distance-path-loss-or-log-normal-shadowing-model/> (visité le 18/06/2026).
- [79] T. RAMA RAO, D. BALACHANDER et Nishesh TIWARI. "UHF short-range pathloss measurements in forest plantation environments for wireless sensor networks". In : *2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*. 2012, p. 194-198. DOI : [10.1109/ICCS.2012.6406137](https://doi.org/10.1109/ICCS.2012.6406137).
- [80] Y. S. MENG, Y. H. LEE et B. C. NG. "Study of Propagation Loss Prediction in Forest Environment". In : *Progress In Electromagnetics Research B* 17 (2009), p. 117-133. DOI : [10.2528/PIERB09070103](https://doi.org/10.2528/PIERB09070103).
- [81] M. O. AL-NUAIMI et R. B. L. STEPHENS. "Measurements and Prediction Model Optimisation for Signal Attenuation in Vegetation Media at Centimetre Wave Frequencies". In : *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation* 145.3 (juin 1998), p. 201-206. DOI : [10.1049/ip-map:19981883](https://doi.org/10.1049/ip-map:19981883).
- [82] David L. NDZI et al. "Vegetation Attenuation Measurements and Modeling in Plantations for Wireless Sensor Network Planning". In : *Progress In Electromagnetics Research B* 36 (2012), p. 283-301. DOI : [10.2528/PIERB11091908](https://doi.org/10.2528/PIERB11091908).
- [83] Adebayo ADEWUMI et Olabisi OLUSEGUN. "CHARACTERIZATION AND MODELING OF VEGETATION EFFECTS ON UHF PROPAGATION THROUGH A LONG FORESTED CHANNEL". In : *Progress In Electromagnetics Research Letters* 73 (jan. 2018), p. 9-16. DOI : [10.2528/PIERL17092004](https://doi.org/10.2528/PIERL17092004).
- [84] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Recommendation ITU-R P.833-10 : Attenuation in Vegetation*. ITU-R Recommendation P.833-10. ITU Radiocommunication Sector (ITU-R), 27 sept. 2021. URL : <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833-10-202109-I/en> (visité le 19/06/2026).
- [85] Jin JIN et al. "A 4.8-dB NF, 440- W Bluetooth Receiver Front-End With a Cascode Noise Canceling LNTA". In : *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 31 (mai 2021), p. 489-492. DOI : [10.1109/LMWC.2021.3062901](https://doi.org/10.1109/LMWC.2021.3062901).
- [86] Haijun SHAO et al. "A 266- μ W Bluetooth Low-Energy (BLE) Receiver Featuring an N -Path Passive Balun-LNA and a Pipeline Down-Mixing BB-Extraction Scheme Achieving 77-dB SFDR and -3 -dBm OOB- B_{-1} dB". In : *IEEE Journal of Solid-State Circuits* PP (déc. 2022), p. 1-12. DOI : [10.1109/JSSC.2022.3200932](https://doi.org/10.1109/JSSC.2022.3200932).
- [87] Jin JIN et al. "A 400-W IoT Low-IF Voltage-Mode Receiver Front-End With Charge-Sharing Complex Filter". In : *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 57 (juill. 2022), p. 1-1. DOI : [10.1109/JSSC.2022.3161340](https://doi.org/10.1109/JSSC.2022.3161340).
- [88] Mehdi NASROLLAHPOUR et al. "Bluetooth Low Energy (BLE) Direct Down Conversion Receiver Front End in 65nm CMOS Technology". In : (sept. 2017). DOI : [10.1109/NGCAS.2017.44](https://doi.org/10.1109/NGCAS.2017.44).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl