



HAL
open science

Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT

Sébastien Maudet

► **To cite this version:**

Sébastien Maudet. Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT. Electronique. Nantes Université, 2024. Français. NNT : 2024NANU4002 . tel-04662678

HAL Id: tel-04662678

<https://theses.hal.science/tel-04662678>

Submitted on 26 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 641

*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : Électronique, Télécommunications

Par

Sébastien MAUDET

Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 24 juin 2024

Unité de recherche : Institut d'Électronique et des Technologies du numéRIque, UMR CNRS 6164

Rapporteurs avant soutenance :

Guillaume FERRÉ Professeur des Universités, Bordeaux INP ENSEIRB-MATMECA

Laurent TOUTAIN Professeur de l'École des Mines-IMT, IMT Atlantique

Composition du Jury :

Président :

Olivier BERDER

Professeur des Universités, Université de Rennes

Examineurs :

Guillaume FERRÉ

Professeur des Universités, Bordeaux INP ENSEIRB-MATMECA

Isabelle GUÉRIN-LASSOUS

Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1

Laurent TOUTAIN

Professeur de l'École des Mines-IMT, IMT Atlantique

Dir. de thèse :

Guillaume ANDRIEUX

Professeur des Universités, Nantes Université

Co-dir. de thèse :

Jean François DIOURIS

Professeur des Universités, Nantes Université

Co-encadrant de thèse :

Romain CHEVILLON

Maître de Conférences, Nantes Université

à Valériane, Éline et Camille.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Guillaume Andrieux qui a été un soutien sans faille et qui m'a accompagné avec bienveillance durant toutes ces années de thèse. Sa disponibilité et ses inestimables conseils sont pour beaucoup dans l'aboutissement de ce travail. J'adresse également toute ma reconnaissance à Jean-François Diouris qui m'a fait confiance et m'a permis de réaliser ces travaux. Je remercie tout autant Romain Chevillon pour ces relectures attentives, ses critiques et ses conseils.

J'adresse ensuite tous mes remerciements à Olivier Berder, Guillaume Ferré, Isabelle Guérin Lassous et Laurent Toutain pour avoir accepté de faire partie de mon jury. Leurs analyses et leurs suggestions nourriront sans aucun doute mes réflexions pour de futurs travaux de recherche.

Je remercie ma conjointe Valériane et mes enfants Éline et Camille, qui m'ont soutenu et encouragé. Ils ont été malgré eux les passagers clandestins de cette aventure.

Il m'est impossible d'oublier mes collègues du département Réseaux et Télécommunications de l'IUT de La Roche sur Yon, Audrey, Bruno, Caroline, Christophe, Francesca, Stephen et Stéphanie pour leur gentillesse et leur aide au quotidien. Je remercie également l'ensemble de l'équipe IETR qui a vu évoluer mon travail et qui a su m'encourager lors de nos nombreux échanges.

Pour finir, je souhaite remercier mes parents pour leur présence bienveillante. Cette thèse est un peu leur réussite. Mes ultimes remerciements vont à mes amis qui m'ont juste fait rire et amusé.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
1 Présentation des réseaux IoT	3
1.1 L'Internet des objets ou Internet of Things (IoT)	3
1.1.1 Définition de l'IoT	3
1.1.2 Les applications de l'IoT	4
1.1.3 Les défis et les contraintes de l'IoT	5
1.2 L'architecture et la modélisation des réseaux IoT	7
1.2.1 La modélisation des réseaux IoT	7
1.2.2 L'objet connecté ou le capteur/actionneur IoT (Niveau 1)	8
1.2.3 Les réseaux de collecte de données (Niveau 2)	10
1.2.4 La plateforme IoT et les services Cloud (Niveau 3 et 4)	12
1.3 Les protocoles de communication pour l'IoT	14
1.3.1 Les protocoles de traitement de l'information pour l'IoT	15
1.3.2 Les protocoles de transport de l'information pour l'IoT	18
1.4 Discussions et conclusion	25
2 Fonctionnement du protocole 802.11ah	29
2.1 Les protocoles Wi-Fi et Wi-Fi HaLow	29
2.2 Description de la couche PHY du protocole 802.11ah	31
2.2.1 La modulation OFDM	31
2.2.2 Le multiplexage spatial	33
2.2.3 Les modèles de propagation proposés par le TGah	34
2.2.4 Structure des trames de couche PHY	36
2.2.5 Structure d'un émetteur/récepteur 802.11ah	39
2.2.6 Modélisation mathématique de la trame de couche physique	42
2.3 Description de la couche MAC du protocole 802.11ah	44
2.3.1 Architecture d'un réseau Wi-Fi HaLow	45
2.3.2 Types de stations	45
2.3.3 La méthode d'accès au media DCF	45
2.3.4 Méthode d'accès au media EDCA	49
2.3.5 Mécanismes d'association/authentification	50

2.3.6	Mécanisme d'identification AID	51
2.3.7	Structure des trames de couche MAC	51
2.3.8	Fragmentation et agrégation des trames de couche MAC	52
2.3.9	Accusés de réception par blocs	53
2.4	Mécanismes d'optimisation énergétique du 802.11ah	54
2.4.1	Modes de fonctionnement d'une station 802.11ah	54
2.4.2	Mécanismes d'économie d'énergie hérités du 802.11	54
2.4.3	Le mécanisme d'indication virtuel TIM	55
2.4.4	Les mécanismes d'optimisation du taux d'occupation du canal	56
2.4.5	Le mécanisme d'accès au media RAW	56
2.4.6	Le mécanisme d'accès au media TWT	58
3	Mesures et modélisation des performances du protocole 802.11ah	61
3.1	État de l'art	61
3.2	Choix des métriques étudiés pour le protocole 802.11ah	62
3.3	Définition théorique des métriques du protocole 802.11ah	63
3.3.1	Définition de la taille et du format des trames	63
3.3.2	Définition du temps d'aller-retour d'une trame	65
3.3.3	Définition du débit binaire et du débit de données	67
3.3.4	Définition du taux d'erreur de paquets (PER)	68
3.4	Mesure et analyse des performances du protocole 802.11ah	69
3.4.1	Matériel utilisé dans les expérimentations	69
3.4.2	Configuration des expériences de mesures physiques	70
3.4.3	Impact de la distance sur le RSSI	72
3.4.4	Impact du RSSI sur le MCS	75
3.4.5	Impact du MCS sur le débit de données	78
3.4.6	Impact du MCS sur la durée d'un échange (Round Trip Time)	80
3.4.7	Impact du SNR sur le taux d'erreur de paquets	82
3.5	Discussions et conclusion	83
4	Mesure et modélisation énergétique du protocole 802.11ah	85
4.1	État de l'art	85
4.2	Mesure de l'énergie consommée par une station 802.11ah	86
4.2.1	Définition de l'efficacité énergétique	86
4.2.2	Banc de test mis en œuvre dans les expériences	87
4.2.3	Analyse des trames échangées entre la station et l'AP	88
4.2.4	Mesure du courant consommé par une station non-TIM	88
4.2.5	Mesure du courant consommé par une station TIM	90

4.2.6	Mesure du courant consommé par l'amplificateur (FEM)	94
4.3	Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah	94
4.3.1	Analyse théorique de l'énergie consommée	94
4.3.2	Énergie consommée pendant une phase de réveil	96
4.3.3	Énergie consommée par bit utile transmis	97
4.3.4	Prévision de la durée de vie des stations	98
4.3.5	Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah	99
4.4	Modélisation de la consommation énergétique d'une station 802.11ah	100
4.4.1	Définition du modèle de propagation	100
4.4.2	Modélisation de l'environnement d'une station 802.11ah	101
4.4.3	Modélisation du fonctionnement d'une station 802.11ah	103
4.4.4	Modélisation de l'énergie consommée par une station 802.11ah	111
4.4.5	Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah	113
4.5	Discussions et conclusion	122
5	Mesures et modélisation énergétique du protocole LoRa	125
5.1	État de l'art	125
5.1.1	Généralités sur le protocole LoRa	125
5.1.2	Travaux portant sur la consommation énergétique du protocole LoRa	126
5.2	Fonctionnement des protocoles LoRa/LoRaWAN	127
5.2.1	Architecture des réseaux LoRa/LoRaWAN	127
5.2.2	La couche physique LoRa	128
5.2.3	Les couches MAC et application LoRaWAN	131
5.2.4	Temps de transmission des trames LoRa (ToA)	134
5.3	Mesure de l'énergie consommée par un nœud LoRaWAN	134
5.3.1	Analyse théorique de la consommation d'énergie	134
5.3.2	Protocole de mesure expérimental mis en œuvre	135
5.3.3	Résultats des mesures de consommation énergétique	136
5.4	Modélisation de la consommation énergétique d'un nœud LoRaWAN	141
5.4.1	Probabilités d'erreur et de collision	141
5.4.2	Modélisation de la consommation énergétique pour une transmission	142
5.4.3	Modélisation de la consommation énergétique pour une retransmission multiple	147
5.4.4	Analyse de l'énergie consommée par un nœud LoRaWAN	148
5.5	Discussions et conclusion	154

6	Comparaison des protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN	157
6.1	Comparaison des caractéristiques de transmission	157
6.2	Comparaison de la consommation énergétique	159
6.2.1	Comparaison des dispositifs utilisés dans les expériences	159
6.2.2	Énergie consommée par phase de réveil	159
6.2.3	Durée de vie d'un objet connecté	161
6.3	Discussions et conclusion	162
	Conclusion	165
A	Utilisation de la bande de fréquences EU-868	169
B	Calcul de la surface occupée par les stations 802.11ah exposées et cachées	171
C	Mécanismes d'optimisation du taux d'occupation du canal	173
D	Détermination de la probabilité d'abandon d'une trame au niveau de la passerelle LoRaWAN	175
	Liste des publications	177
	Bibliographie	179

TABLE DES FIGURES

1.1	Modélisation en quatre couches d'un réseau IoT	7
1.2	Architecture physique d'un réseau IoT	8
1.3	Architecture physique d'un objet connecté	8
1.4	Topologies généralement mises en œuvre dans un réseau IoT	11
1.5	Services fournis par une plateforme <i>Cloud</i> dans un réseau IoT	13
1.6	Architecture des solutions Mist / Edge et Fog Computing	14
1.7	Exemple d'un échange immédiat et d'un échange différé en CoAP	15
1.8	Exemple d'un échange <i>Publish/Subscribe</i> en MQTT	16
1.9	Répartition des technologies IoT en fonction du débit de données	26
1.10	Répartition des technologies IoT en fonction de la latence	27
1.11	Répartition des technologies IoT en fonction de la portée de transmission	27
1.12	Répartition des technologies IoT en fonction de l'efficacité énergétique	27
2.1	Bandes de fréquences utilisées par le 802.11ah dans différentes régions du monde	31
2.2	Principe de la modulation OFDM	31
2.3	Caractéristiques de la modulation OFDM pour le 802.11ah	32
2.4	Format d'une trame physique courte ($BW \geq 2$ MHz)	36
2.5	Format d'une trame physique longue ($BW \geq 2$ MHz)	36
2.6	Format d'une trame physique 1M ($BW=1$ MHz)	37
2.7	Forme temporelle d'un signal OFDM pour une trame S1G_1M	38
2.8	Diagramme de fonctionnement d'un émetteur 802.11ah	40
2.9	Diagramme de fonctionnement d'un récepteur 802.11ah	41
2.10	Principe de fonctionnement du mécanisme DCF	46
2.11	Principe de fonctionnement du mécanisme DCF lors d'une collision	47
2.12	Principe de fonctionnement des mécanismes RTS/CTS et NAV	47
2.13	Principe de fonctionnement du mécanisme d'accès au média EDCA	50
2.14	Architecture du mécanisme d'identification AID	52
2.15	Structure d'une trame de données MAC 802.11ah	52
2.16	Schémas d'agrégation d'une trame 802.11ah	53
2.17	Principe de fonctionnement d'une session <i>Block Ack</i>	53
2.18	Principe de fonctionnement du mécanisme TIM	55
2.19	Principe de fonctionnement du mécanisme RAW	57

TABLE DES FIGURES

2.20	Principe de fonctionnement du mécanisme TWT	59
3.1	Format des trames de données 802.11ah utilisées dans les expériences	64
3.2	Format des trames de données agrégées 802.11ah utilisées dans les expériences	64
3.3	Format des trames RTS et NDP 802.11ah utilisées dans les expériences	64
3.4	Échanges 802.11ah sans utilisation du mécanisme RTS/CTS	66
3.5	Échanges 802.11ah avec utilisation du mécanisme RTS/CTS	66
3.6	Dispositif utilisé dans les expériences : Raspberry Pi 3B et AHPI-7292S	69
3.7	Localisation des équipements dans l'environnement extérieur	70
3.8	Localisation des équipement dans l'environnement intérieur	71
3.9	Commande <i>ping</i> utilisée dans les expériences	72
3.10	Commande <i>iperf</i> utilisée dans les expériences	72
3.11	Intensité du signal reçu en extérieur en fonction de la distance ($P_{ta} = 23$ dBm)	73
3.12	Intensité du signal reçu en extérieur en fonction de la distance ($P_{ta} = 14$ dBm)	73
3.13	Intensité du signal reçu en extérieur en fonction de la distance ($P_{ta} = 0$ dBm)	74
3.14	Intensité du signal reçu en intérieur en fonction de la distance ($P_{ta} = 0$ dBm)	75
3.15	MCS en fonction du RSSI dans un environnement extérieur ($BW = 1$ MHz)	76
3.16	MCS en fonction du RSSI dans un environnement extérieur ($BW = 2$ MHz)	76
3.17	MCS en fonction du RSSI dans un environnement intérieur ($BW = 1$ MHz)	77
3.18	MCS en fonction du RSSI dans un environnement intérieur ($BW = 2$ MHz)	77
3.19	Débit en fonction du MCS pour un intervalle de garde court ($BW = 1$ MHz)	78
3.20	Débit en fonction du MCS pour un intervalle de garde court ($BW = 2$ MHz)	79
3.21	Débit en fonction du MCS pour un intervalle de garde long ($BW = 1$ MHz)	79
3.22	Débit en fonction du MCS pour un intervalle de garde long ($BW = 2$ MHz)	80
3.23	RTT en fonction du MCS pour un intervalle de garde court ($BW = 1$ MHz)	80
3.24	RTT en fonction du MCS pour un intervalle de garde court ($BW = 2$ MHz)	81
3.25	RTT en fonction du MCS pour un intervalle de garde long ($BW = 1$ MHz)	81
3.26	RTT en fonction du MCS pour un intervalle de garde long ($BW = 2$ MHz)	82
3.27	PER en fonction du SNR pour un intervalle de garde long ($BW = 1$ MHz)	83
4.1	Banc d'essai expérimental de la consommation d'énergie d'un capteur 802.11ah	87
4.2	Échange de données entre une station 802.11ah et l'AP lors d'une phase de réveil	88
4.3	Courant consommé par une station non-TIM lors de différentes phases de réveil	89
4.4	Courant consommé par une station non-TIM lors d'une phase de réveil	89
4.5	Courant consommé par une station TIM lors de différentes phases de réveil	91
4.6	Courant consommé par une station TIM pour recevoir les trames balise TIM	91
4.7	Courant consommé par une station TIM lors d'une phase de transmission	93
4.8	Durée des différentes trames échangées par la station durant une phase de réveil	96

4.9	Énergie consommée par la station pour les différentes trames échangées durant une phase de réveil	96
4.10	Énergie par bit utile consommée par la station lors d'une phase de réveil	97
4.11	Représentation des zones cachées et exposées pour une station	101
4.12	Modélisation du cycle de fonctionnement d'une station 802.11ah	103
4.13	Modélisation d'une tentative d'accès au média avec le mécanisme DCF/EDCA	104
4.14	Modélisation du simulateur de réseau 802.11ah sous Matlab	110
4.15	Probabilité de transmission avec succès simulé sous Matlab	111
4.16	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah pour différentes puissances de transmission (sans RTS/CTS)	115
4.17	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes puissances de transmission (avec RTS/CTS)	115
4.18	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes valeurs de charge utile (sans RTS/CTS)	116
4.19	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée pour différentes valeurs de charge utile (avec RTS/CTS)	117
4.20	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes tentatives autorisées (sans RTS/CTS)	118
4.21	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes tentatives autorisées (avec RTS/CTS)	118
4.22	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes valeurs de distance (sans RTS/CTS)	119
4.23	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différentes valeurs de distance (avec RTS/CTS)	120
4.24	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différents cycles de service (sans RTS/CTS)	121
4.25	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah pour différents cycles de service (avec RTS/CTS)	121
5.1	Architecture physique d'un réseau LoRa/LoRaWAN.	127
5.2	Modélisation OSI des protocoles LoRa/LoRaWAN	128
5.3	Canaux de communication utilisés en Europe	129
5.4	Principe de la modulation CSS	129
5.5	Fonctionnement du mécanisme d'accès au média LoRaWAN en Classe A	131
5.6	Structure de la trame LoRa de couche physique	133
5.7	Structure de la trame LoRaWAN des couches MAC et application	133
5.8	Banc d'essai expérimental de la consommation d'énergie d'un capteur LoRa	135

TABLE DES FIGURES

5.9	Photographies du banc d'essai expérimental	136
5.10	Courant consommé par le circuit sx1272 lors de différentes phases de réveil . . .	137
5.11	Courant consommé par le circuit sx1272 lors d'une transmission et d'une réception	138
5.12	Courant consommé par la carte <i>Nucleo L073RZ</i> lors d'une phase de réveil	140
5.13	Diagramme d'état d'un nœud LoRaWAN lors d'une transmission	143
5.14	Évolution de l'état d'un nœud LoRaWAN lors d'une transmission	143
5.15	Durée d'une phase de communication d'un capteur LoRa dans différentes situations	145
5.16	Énergie totale consommée par le nœud LoRa dans les différentes situations . . .	146
5.17	Portée maximale d'un nœud LoRa en fonction du DR	149
5.18	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes puissances d'émission	150
5.19	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes charges utiles	151
5.20	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes tentatives autorisées	152
5.21	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes distances	153
5.22	Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différents rapports cyclique	153
6.1	Débit binaire théorique des protocoles LoRaWAN et 802.11ah	158
6.2	Durée d'un échange complet des protocoles LoRaWAN et 802.11ah	158
6.3	Portée maximale des protocoles LoRaWAN et 802.11ah	158
6.4	Comparaison de l'énergie consommée par un équipement LoRaWAN et 802.11ah	160
6.5	Comparaison de la durée de vie d'un équipement LoRaWAN et 802.11ah	161
A.1	Découpage et limitations de la bande de fréquences EU-868	169
A.2	Utilisation de la bande de fréquences EU-868 par différentes technologies IoT . .	169
A.3	Techniques d'accès au média avec politesse	170
B.1	Représentation de la surface occupée par les stations cachées et exposées	171
C.1	Formats des en-têtes MAC du protocole Wi-Fi	173
C.2	Accès au média avec le mécanisme RID	174

GLOSSAIRE

- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project. 22, 23, 34
- A-MPDU** Aggregate MAC Protocol Data Unit. 53, 78
- A-MSDU** Aggregate MAC Service Data Unit. 52, 53
- ABP** Activation By Personalisation. 135
- ACK** ACKnowledgment. 15, 16, 46–49, 54, 56, 63–66, 78–80, 88, 90, 93, 113, 133, 134, 136–143, 145, 146, 157, 174
- ADC** Analog Digital Converter. 160
- ADR** Adaptative Data Rate. 150, 154
- AES** Advanced Encryption Standard. 20, 21, 24, 25
- AFA** Adaptive Frequency Agility. 170
- AID** Association IDentifier. 22, 44, 50–52, 57, 58, 60, 88, 173
- AIFS** Arbitration Inter-Frame Space. 49, 50, 65–67, 95
- AMQP** Advanced Message Queuing Protocol. 17
- AP** Access Point. 21, 34, 37, 45, 48, 50, 51, 54, 55, 57–60, 63, 69–72, 75, 76, 87, 88, 91, 96, 97, 99–104, 106, 113, 114, 116, 117, 119, 122, 123, 171, 172
- API** Application Programming Interface. 13, 15
- APSD** Automatic Power Save Delivery. 54, 55, 59
- ARP** Address Resolution Protocol. 88, 90, 93, 96, 97, 104
- ASK** Amplitude Shift Keying. 19
- BA** Block Acknowledgement. 53, 54
- BAR** Block Acknowledgement Request. 54
- BCC** Binary Convolutional Coding. 41, 42, 44, 65
- BER** Bit Error Rate. 68
- BLE** Bluetooth Low Energy. 19, 20, 25–27
- BPSK** Binary Phase Shift Keying. 19–21, 33, 39, 40, 43
- BSS** Basic Service Set. 45

- BW** BandWidth. 36, 37, 90, 93, 129, 130, 134
- CAC** Centralized Authentication Control. 51
- CBOR** Concise Binary Object Representation. 154
- CCA** Clear Channel Assessment. 47, 48, 170
- CCA-ED** Clear Channel Assessment - Energy Detection. 47, 101
- CCA-SD** Clear Channel Assessment - Signal Detection. 46, 101
- CoAP** Constrained Application Protocol. 15–17, 87, 88, 90, 91, 93, 95–97, 100, 104, 114
- CPU** Central Processing Unit. 160
- CR** Code Rate. 129, 130, 132, 134, 142
- CRC** Cyclic Redundancy Check. 132–134
- CSB** Cross Slot Boundary. 58
- CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. 20–22, 45, 54, 57, 95, 108, 109
- CSS** Chirp Spread Spectrum. 24, 128, 129, 142
- CTS** Clear To Send. 47, 48, 60, 63–66, 78, 80, 81, 87, 114–123
- CW** Collision Window. 48, 49, 66, 67
- DAC** Distributed Authentication Control. 51
- DBPSK** Differential Binary Phase Shift Keying. 24
- DCF** Distributed Coordination Function. 45–50, 58, 60, 65, 86, 88, 100, 104, 122
- DDS** Data Distribution Service. 17
- DFS** Dynamic Frequency Selection. 30
- DIFS** Distributed Inter-Frame Space. 46, 48, 49
- DL MU-MIMO** DownLink Multi-User Multiple Input Mutiple Output. 21, 34
- DR** Data Rate. 130–132, 135–138, 145–152, 154, 157, 159, 162
- DS** Distribution Service. 45
- DSSS** Direct-Sequence Spread Spectrum. 18, 20, 30
- DTIM** Delivery Target Indication Map. 56, 57, 98, 99
- DTLS** Datagram Layer Transport Security. 15
- EAP** Extended Authentication Protocol. 50

- EDCA** Enhanced Distributed Coordination Access. 49, 50, 58, 60, 65, 88, 100, 104–106, 110, 122
- EEA** Evolved packet system Encryption Algorithms. 23
- EEPROM** Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory. 160
- EIA** Evolved packet system Integrity Algorithms. 23
- EIFS** Extended Inter-Frame Space. 46, 48, 49, 67, 112
- EOSP** End Of Service Period. 55
- ESS** Extended Service Set. 45
- EVK** EValuation Kit. 70, 88
-
- FC** Frame Control. 52, 64, 65, 173
- FCS** Frame Check Sequence. 51, 54, 58, 65
- FEC** Forward Error Correction. 41
- FEM** Front End Module. 82, 92–94
- FFD** Full Function Device. 20
- FFT** Fast Fourier Transform. 32, 38, 41
- FHSS** Frequency-Hopping Spread Spectrum. 18, 19, 30
- FOTA** Firmware Over The Air. 89
- FSK** Frequency Shift Keying. 24
-
- GFSK** Gaussian Frequency Shift Keying. 19, 24
- GI** Guard Interval. 33, 39, 42, 44, 66, 67
- GPIO** General Purpose Input/Output. 10, 160
- GSM** Global System for Mobile communications. 30
-
- HR-DSSS** High Rate-Direct-Sequence Spread Spectrum. 30
- HT** High Throughput. 173
- HTTP** HyperText Transfer Protocol. 15
-
- I2C** Inter-Integrated Circuit. 138, 160
- IaaS** Infrastructure as a Service. 13
- IBSS** Independent Basic Service Set. 45
- ID** Identifier. 16, 20, 24
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers. 20, 26

- IETF** Internet Engineering Task Force. 9, 14, 17
- IFFT** Inverse Fast Fourier Transform. 40
- IoT** Internet of Things. 1–15, 17, 18, 21, 22, 25–30, 44, 56, 60–63, 67, 72, 83–86, 98, 123, 126, 138, 141, 157, 160–162, 165–167, 169
- IP** Internet Protocol. 22, 30, 51, 65, 67, 78, 84, 87, 88, 91, 92, 96, 104, 127, 159, 162, 166
- JSON** JavaScript Object Notation. 87, 89, 91, 93
- LBT** Listen Before Talk. 170
- LDPC** Low Density Parity Check. 41, 42
- LLC** Logical Link Control. 65, 67, 78
- LoS** Line of Sight. 71, 74, 75, 77
- LPWAN** Low Power Wide Area Network. 11, 23, 26–29, 61, 84, 125, 126
- LTE** Long Term Evolution. 22, 23
- LTE-M** Long Term Evolution for Machines. 25–27
- LTFF** Long Training Field. 37, 38, 40, 41, 44, 63, 66
- lwM2M** light weight Machine to Machine. 17, 87, 88, 95
- M2M** Machine to Machine. 22, 44
- MAC** Media Access Control. 17, 20–25, 29, 30, 36, 39, 41, 44, 48, 51–53, 55, 56, 60–65, 67, 69, 78, 79, 88, 89, 92, 96, 104, 110, 112, 127, 132–135, 154, 167, 173
- MBSS** Mesh Basic Service Set. 45
- MCS** Modulation and Coding Scheme. 39, 40, 42, 43, 63, 67, 70–72, 74–83, 87, 88, 90, 93, 94, 96–98, 100–103, 107, 111, 113, 114, 119, 157, 159, 171, 172
- MIC** Mandatory Integrity Control. 132, 134
- MIMO** Multiple Input Multiple Output. 21, 31, 33
- MJPEG** Motion Joint Photographic Experts Group. 84
- MPDU** MAC Protocol Data Unit. 36, 37, 39, 52, 53, 78, 92
- MPEG** Moving Picture Experts Group. 84
- MQTT** Message Queuing Telemetry Transport. 16, 17
- MQTT-SN** Message Queuing Telemetry Transport - Sensor Network. 17, 167
- MSDU** MAC Service Data Unit. 51–53, 65, 67
- MU-MIMO** Multiple User-Multiple Input Multiple Output. 30

- NAV** Network Allocation Vector. 47, 48, 50, 52, 56, 64, 173
- NB-IoT** Narrow Band IoT. 22, 23, 25–27, 167
- NDP** Null Data Packet. 56, 60, 63–66, 78, 80, 88, 90, 93
- NFC** Near Field Communication. 18, 19, 26
- NLoS** Non Line of Sight. 71, 74, 75, 77
- NRZ** Non Return to Zero. 19
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Modulation. 21, 30–33, 37–41, 43, 60, 64, 67, 68, 167
- OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access. 22, 23, 30
- OOK** On-Off Keying. 19
- OS** Operating System. 89, 91–93, 135
- OSI** Open Systems Interconnection. 14, 15, 127, 128
- OWE** Opportunistic Wireless Encryption. 70
- PaaS** Platform as a Service. 13
- PER** Packet Error Rate. 42, 62, 63, 68, 69, 71, 72, 82, 83, 126
- PHY** PHYsical. 20, 21, 24, 29, 30, 40, 44, 48, 52, 60, 63, 64, 69, 78, 89, 127
- PLCP** Physical Layer Convergence Protocol. 36, 37, 39, 173, 174
- PPDU** Physical Protocol Data Unit. 36, 53
- PRAW** Periodic Restricted Access Window. 58, 59
- PSDU** Physical Service Data Unit. 39, 53
- PSK** Pre Shared Key. 70
- PV0** Protocol Version 0. 56, 64, 173
- PV1** Protocol Version 1. 56, 64, 88, 173
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation. 21, 33, 40, 43
- QoS** Quality of Service. 30, 49, 50, 52–56, 64–67, 88, 90, 93, 95–97, 103, 104, 114, 167, 173
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying. 20, 21, 33, 40, 43
- RAM** Random Access Memory. 9, 21–25, 138
- RAW** Restricted Access Window. 22, 44, 45, 56–58, 60, 62, 86, 88, 99, 100, 122, 123
- REST** REpresentational State Transfer. 15
- RF** Radio Frequency. 18–21, 23, 24

- RFC** Requests For Comments. 9, 15, 18
- RFD** Reduced Function Device. 20
- RFID** Radio Frequency IDentification. 18, 26, 169
- RID** Response Indication Deferral. 56, 173, 174
- RISC** Reduced Instruction Set Computer. 160
- ROM** Read Only Memory. 21, 69
- RPS** RAW Parameters Set. 57, 58
- RSSI** Received Signal Strength Indicator. 19–21, 23, 24, 62, 63, 71–77, 82, 126
- RTS** Request To Send. 47, 48, 63–66, 78, 80, 81, 87, 114–123
- RTT** Round Trip Time. 62, 65, 80–84
- SaaS** Software as a Service. 13
- SAE** Simultaneous Authentication of Equals. 70
- SC** Sequence Control. 52, 64, 173
- SC-FDMA** Single Carrier Frequency Division Multiple Access. 22, 23
- SCHC** Static Context Header Compression. 167
- SF** Spreading Factor. 129–131, 134, 141, 142, 148, 149, 175
- SIFS** Short Inter-Frame Space. 46, 48–50, 66, 67, 95
- SIG** SIGnal. 37–41, 44, 56, 63, 65, 66
- SNR** Signal Noise Ratio. 63, 71, 77, 82, 83, 126
- SoC** System on Chip. 86, 87, 159
- SP** Service Period. 54, 55, 59
- SPI** Serial Peripheral Interface. 69, 138, 140, 160
- SRAM** Static Random Access Memory. 69, 160
- SSID** Service Set IDentifier. 50, 87
- SSL** Secure Sockets Layer. 30, 162
- STA** STation. 34, 44–51, 54, 56, 58–60, 63, 65, 69, 70, 72, 74–76, 84, 87–94, 96, 98–106, 108, 110, 113, 123, 172
- STF** Short Training Field. 37, 38, 40, 41, 44, 46, 63, 66
- SU-MIMO** Single User-Multiple Input Multiple Output. 30
- SW** Synchronization Word. 132
- TBTT** Target Beacon Transmission Time. 54

- TCP** Transmission Control Protocol. 17, 22, 30, 51, 91, 92, 127, 159, 162, 166
- TDMA** Time Division Multiplexing Access. 20, 57
- TGah** Task Group of 802.11ah. 34, 35, 62, 64, 72, 73, 75, 83, 88
- TIM** Target Indication Map. 22, 44, 45, 55–60, 86, 88–93, 98–100, 122, 123, 159
- TLS** Transport Layer Security. 30, 162
- TPC** Transmit Power Control. 30
- TSF** Time Synchronization Function. 123
- TSN** Time Sensitive Networking. 167
- TWT** Target Wake Time. 22, 44, 45, 58–60, 62, 86, 88, 99, 100, 122, 123
- TxOP** Transmission OPortunity. 49, 50, 53, 56, 100
-
- UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter. 160
- UDP** User Datagram Packet. 15, 17, 65, 67, 71, 87
- UNB** Ultra Narrow Band. 24
- USRP** Universal Software Radio Peripheral. 62
-
- WBAN** Wireless Body Area Network. 10
- WDS** Wireless Distribution Service. 45
- WIC** Wake-up Interrupt Controller. 10
- WLAN** Wireless Local Area Network. 10
- WMAN** Wireless Metropolitan Area Network. 10, 11
- WNAN** Wireless Neighborhood Area Network. 10, 11
- WPA** Wi-Fi Protected Access. 22, 30, 50, 70
- WPAN** Wireless Personal Area Network. 10, 20, 25, 28, 29
- WSAN** Wireless Sensor Actuator Network. 12
- WSN** Wireless Sensor Network. 12
- WWAN** Wireless Wide Area Network. 11
-
- XML** eXtensible Markup Language. 17
- XMPP** eXtensible Messaging and Presence Protocol. 17
- XOR** eXclusive OR. 41

INTRODUCTION

L'Internet des objets

Le monde est régi par les échanges numériques. Des décennies de progrès dans les domaines de l'électronique ont permis l'avènement d'Internet et des premières télécommunications mobiles. Dès lors, trois évolutions majeures ont modifié les usages. La première concerne la connexion des réseaux à grande échelle avec l'arrivée des premiers fournisseurs d'accès à Internet et la standardisation des échanges (*World Wide Web*). La seconde est celle de l'interactivité des réseaux sociaux, rendue possible par l'Internet mobile et le *Cloud*. La troisième qui s'annonce sera plus discrète et connectera les objets physiques du quotidien à un monde virtuel (IoT) où les données seront massives (*Big Data*) et où les algorithmes auront des capacités d'apprentissage (*Intelligence Artificielle*). Ces évolutions se traduisent par un nombre sans cesse plus croissant d'échanges d'informations [1] et le développement de nombreux outils qui transformeront les sociétés humaines de façon spectaculaire.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à cette dernière évolution, et plus particulièrement à l'Internet des Objets. Par rapport aux réseaux informatiques classiques, les réseaux IoT sont contraints en ressources et ont des exigences critiques. La conception de nouvelles infrastructures et de nouveaux protocoles est rendue nécessaire par ces contraintes. La mise en œuvre d'une solution IoT doit être facile et rentable, en particulier si l'objet connecté n'a pas accès à une source d'alimentation en énergie fiable et robuste. Les protocoles de communications ont toujours proposé des mécanismes d'optimisation de la consommation énergétique mais cette caractéristique était souvent considérée comme secondaire. Avec l'IoT, le nombre de dispositifs devient conséquent, ils sont dispersés géographiquement et l'accès à l'énergie est peu fiable. De plus, le remplacement d'une batterie peut être coûteux pour une multitude d'objets hétérogènes. Tous ces éléments ont renforcé l'intérêt de la communauté scientifique pour la consommation énergétique des réseaux IoT.

Pour optimiser l'énergie consommée par un dispositif IoT, il faut tout d'abord analyser son fonctionnement, élaborer des modèles mathématiques de consommation énergétique, puis étudier l'impact des différentes caractéristiques du réseau sur cette consommation. Ce sont les objectifs que nous nous sommes fixés à travers ces travaux.

Organisation et contributions

L'objectif de cette thèse est de fournir une analyse et une modélisation énergétiques de deux des protocoles de communications les plus emblématiques du domaine de l'IoT, à savoir le protocole Wi-Fi HaLow et le protocole LoRaWAN.

Dans le premier chapitre, nous définissons le concept d'IoT, ses principaux domaines d'application, ses contraintes et ses défis. Nous utilisons une modélisation générique, afin de décrire les différents éléments constitutifs d'un réseau IoT. Nous présentons une description détaillée d'un grand nombre de protocoles de communication pour l'IoT, afin de les comparer et de justifier le choix des deux protocoles étudiés par la suite.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons le protocole 802.11ah en examinant tout d'abord ses caractéristiques physiques, puis en définissant les bases théoriques qui permettront de modéliser son fonctionnement. Nous détaillons ses méthodes d'accès au média et ses différents mécanismes de gestion de l'énergie. Compte tenu de cette analyse préalable, ce travail constitue une synthèse importante sur laquelle nous nous appuyerons par la suite, pour apporter notre propre contribution sur le sujet.

Dans le troisième chapitre, les performances du protocole 802.11ah sont mesurées et qualifiées au moyen d'un banc d'essai. Le débit, la latence et le taux d'erreur de paquets sont modélisés et comparés aux mesures réalisées sur le banc de test. Notre travail propose puis valide de ce fait deux modèles de propagation, l'un pour un environnement intérieur et le second pour un environnement extérieur.

La consommation énergétique du protocole 802.11ah est abordée dans le quatrième chapitre. Des mesures sont réalisées sur un banc de test qui intègre, pour la première fois, dans un réseau IoT complet, un dispositif utilisant la technologie Wi-Fi HaLow. Ces mesures nous permettent de comparer différents mécanismes d'économie d'énergie et de développer un modèle mathématique de consommation énergétique, basé sur des chaînes de Markov absorbantes. Il se révèle être le premier modèle basé sur des mesures prenant en compte l'environnement du dispositif et les multiples couches inhérentes à une transmission.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons la technologie LoRa/LoRaWAN et nous proposons un modèle de consommation énergétique plus complet que ceux de la littérature, qui s'appuie sur des mesures réalisées une nouvelle fois sur un banc de test. Ce dernier intègre les différents éléments d'un réseau LoRaWAN, du capteur au serveur d'application. Le modèle proposé prend ainsi en considération l'environnement d'un nœud et respecte l'ensemble des recommandations de la norme LoRaWAN.

Les protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN sont comparés dans le sixième chapitre, en nous fondant sur les modèles élaborés dans les chapitres 3, 4 et 5. Enfin, nous concluons nos travaux par la mise en perspective de ces deux protocoles, de leurs champs d'application et des travaux de recherche qui pourraient être menés à l'issue de cette thèse.

PRÉSENTATION DES RÉSEAUX IOT

Introduction

Les progrès dans l'intégration et la miniaturisation des circuits électroniques ont permis d'insérer des briques intelligentes et communicantes dans les objets du quotidien. Si on ajoute à cela l'augmentation exponentielle des capacités de stockage et de traitement des serveurs de données, on commence à entrevoir le concept d'Internet des Objets (ou IoT). Ce chapitre a pour objectifs de présenter l'IoT et de justifier le choix des solutions techniques qui seront abordées par la suite. Dans la première partie, nous définissons le concept d'IoT, ses applications, ses défis et ses contraintes. Dans la deuxième partie, nous présentons l'architecture et la modélisation de son fonctionnement. Dans la troisième partie, nous proposons une comparaison des protocoles les plus prometteurs de l'IoT. En conclusion, nous justifions le choix des deux protocoles de communication qui seront étudiés dans les chapitres suivants.

1.1 L'Internet des objets ou Internet of Things (IoT)

1.1.1 Définition de l'IoT

L'IoT désigne un concept où plusieurs objets physiques communiquent entre eux ou avec d'autres entités présentes sur Internet. Internet est utilisé comme l'épine dorsale du système de communication, afin d'établir des interactions entre les personnes et les objets physiques. Ces objets ont des capacités sensorielles. Ils perçoivent leurs environnements et interagissent avec lui. Les données physiques acquises par ces objets sont collectées puis traitées par des serveurs, le plus souvent installés sur des plateformes *cloud*, dans des *data center*. L'IoT est donc un paradigme devenu réalité par l'intégration de circuits communicants dans les objets du quotidien et l'augmentation exponentielle des capacités de stockage et de traitement des données. Ces avancées technologiques ont ouvert la voie à de nouvelles applications et imposé à la communauté scientifique le façonnage de nouveaux protocoles de communication capables de transférer une quantité massive de données provenant de nombreux équipements. Plusieurs définitions officielles existent et chacune d'elles correspond à une vision de l'IoT. Nous en proposons quelques unes ci-dessous.

Définition de l'IoT par l'ITU (*International Telecommunications Union*)

Infrastructure mondiale pour la société de l'information qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existants ou en évolution [2].

Définition de l'IoT par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

L'internet des objets envisage un réseau complexe, adaptatif et auto-configurable qui interconnecte des objets à l'internet par le biais de protocoles de communication standard. Les objets interconnectés ont une représentation physique ou virtuelle dans le monde numérique, une capacité de détection et d'actionnement, une fonction de programmation et sont identifiables de manière unique. La représentation contient des informations telles que l'identité de l'objet, son statut, sa localisation ou toute autre information commerciale, sociale ou privée pertinente. Les objets offrent des services, avec ou sans intervention humaine, grâce à l'exploitation de l'identification unique, de la saisie, de la communication de données et de la capacité d'actionnement [3].

Définition de l'IoT par l'IETF (*Internet Engineering Task Force*)

L'internet des objets fait référence à des dispositifs, souvent limités en termes de capacités de communication et de calcul, qui sont désormais plus couramment connectés à l'internet, ainsi qu'à divers services qui sont construits sur la base des capacités que ces dispositifs fournissent conjointement. On s'attend à ce que cette évolution débouche sur davantage de communications de machine à machine utilisant l'internet sans qu'aucun utilisateur humain ne soit activement impliqué [4].

L'intégration de capteurs et d'actionneurs dans les objets du quotidien n'a jamais été réalisée à cette échelle. Tout ce qui nous entoure peut être intégré dans une solution IoT. En 2015, 15 milliards d'objets étaient connectés directement ou indirectement à Internet. On estime que plus de 75 milliards d'appareils seront connectés à Internet d'ici 2025 [5-7].

1.1.2 Les applications de l'IoT

L'IoT consiste à intégrer des capacités sensorielles à un nombre massif d'équipement, du plus simple objet du quotidien (montre, volets roulants, ...), au plus complexe (véhicule, éolienne,

etc). Il a ouvert la voie à de nouveaux services et de nouvelles applications. De la gestion des villes aux processus industriels, en passant par la production agricole et la santé, il existe autant de domaines que de besoins [8, 9]. Les principaux domaines d'applications sont brièvement décrits ci-dessous.

La ville intelligente (ou **Smart City**) vise à améliorer la qualité de vie des citoyens en optimisant la circulation des flux, la consommation des ressources et la gestion des infrastructures de la ville [10-19]. La gestion du trafic routier, l'automatisation de l'éclairage public, la collecte des ordures, ou encore la mesure de la qualité de l'air sont quelques exemples d'applications.

L'industrie du futur (ou **Industry 4.0**) conceptualise le changement rapide des modes de gestion et de production de l'industrie [20-29]. Ce concept fait référence à la quatrième révolution industrielle qui voit l'intégration de nouvelles technologies telles que l'IoT dans les processus de fabrication. L'usine devient un service. L'IoT y optimise la gestion des stocks, la géolocalisation du matériel et des outils, l'automatisation des lignes et la maintenance préventive.

L'agriculture intelligente (ou **Smart Farming**) fait référence à de nouvelles méthodes de production agricole, telle que l'agriculture de précision [30-40]. Les technologies de l'IoT y sont utilisées pour surveiller et gérer les exploitations, optimiser les rendements, limiter les intrants et préserver les ressources. La surveillance des troupeaux, l'irrigation des cultures, l'utilisation de drones et les prédictions météorologiques sont quelques cas d'usage *Smart Farm*.

La gestion intelligente de l'énergie (ou **Smart Grid**) comprend une variété de mesures opérationnelles permettant de piloter un réseau de production et de distribution d'énergie [41-47]. Ces opérations incluent la mesure de la production en temps réel, l'équilibrage des charges, la redistribution du surplus et la surveillance des systèmes de production et de distribution.

La protection de l'environnement et la détection des catastrophes naturelles englobent des cas d'usage aussi variés que la surveillance des nappes phréatiques et des rivières, la détection des feux de forêt, des tremblements de terre et des glissements de terrain ou encore la surveillance des volcans et la protection de la faune sauvage [25, 48-56].

La santé numérique (ou **e-Health**) est une discipline qui implique des concepts sociétaux, des pratiques médicales et des technologies du numérique avec pour objectifs d'améliorer et de personnaliser les soins de santé [57-67]. L'*e-Health* peut être appliquée au suivi des patients, à la détection des chutes, aux déficiences cardiaques, au suivi des populations d'insectes porteurs de maladie ou à la gestion du matériel médical.

1.1.3 Les défis et les contraintes de l'IoT

L'internet des objets est un concept innovant. Il impose de nouvelles contraintes et de nouveaux défis aux concepteurs de réseau. Les plus critiques concernent la consommation d'énergie, la couverture géographique, le nombre de dispositifs à gérer, la sécurité des réseaux et des données, les coûts de production et d'exploitation [8, 68-70].

La durée de vie des objets est directement liée à la **consommation d'énergie**. Les objets communicants sont généralement déployés avec des ressources énergétiques réduites où le remplacement d'une batterie peut être coûteux. Afin d'augmenter la durée de vie, les circuits électroniques doivent être peu consommateurs en énergie, l'empreinte mémoire doit être minimisée et la complexité des équipements et des logiciels réduite. Les protocoles de communication ont également un rôle à jouer. Ils doivent proposer à chaque objet une équité d'accès aux ressources en fonction de leurs besoins et de la densité de dispositifs dans le réseau.

La **couverture géographique** est une autre problématique majeure. La distance entre les équipements IoT peut être de quelques centimètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Ils sont positionnés en intérieur ou en extérieur, dans un milieu urbain avec une forte densité de bâtiment ou en milieu rural avec une vue plus dégagée. L'utilisation d'une bande de fréquence inférieure à 1 GHz est souvent la première solution adoptée car elle offre de meilleures caractéristiques de propagation. Des techniques de modulation lente et l'utilisation de réseaux maillés peuvent également répondre à ce type de contraintes.

Contrairement aux réseaux classiques, le **nombre de dispositifs** dans un réseau IoT peut être massif et en constante évolution. Cette multitude limite fortement la disponibilité des ressources pour chaque équipement, entraîne une saturation des services de collecte et peut dégrader de façon substantielle les performances du réseau. Les infrastructures de collecte et de traitement doivent être suffisamment et correctement calibrées. Les protocoles de communication répondent à cette problématique en offrant une équité et une diversité d'accès aux ressources.

Les utilisateurs et les concepteurs sont généralement sensibles au **coût de fabrication et au coût d'exploitation**. Les objets connectés doivent être peu coûteux à produire, afin d'assurer une production de masse. Ils doivent consommer peu d'énergie et être facilement "mis à jour". L'installation, le paramétrage et la maintenance sont à considérer en amont du déploiement de la solution, afin d'éviter les trop nombreuses opérations humaines qui pourraient s'avérer coûteuses.

Avec l'IoT, les problèmes de **sécurité** ne concernent plus uniquement le vol de données. Le nombre d'équipements, les communications sans fil, la faible complexité et la localisation des dispositifs augmentent la surface d'attaque et favorisent les vulnérabilités. Les méthodes de collecte, de transmission, de stockage et de traitement des informations influencent fortement la qualité des données fournies et doivent donc être suffisamment robustes pour que les données restent fiables et disponibles.

En résumé, les applications IoT soulèvent de nouvelles contraintes et de nouveaux défis. La liste d'exemples présentée ci-dessus est non-exhaustive. L'interopérabilité, l'hétérogénéité, la prise en charge de la vidéo et de la voix, la facilité de déploiement et la tolérance aux retards sont d'autres contraintes qu'il est possible de prendre en compte en fonction des exigences du domaine d'applications.

1.2 L'architecture et la modélisation des réseaux IoT

1.2.1 La modélisation des réseaux IoT

Différentes modélisations ont été proposées pour représenter l'architecture d'un réseau IoT, mais aucune ne fait réellement consensus. Le choix d'une modélisation dépend du contexte, de la vision et du domaine applicatif [7]. La figure 1.1 présente une modélisation à quatre couches que l'on retrouve généralement dans l'ingénierie des réseaux et télécommunications [8, 9, 68, 69, 71, 72] :

- La couche 1 ou "Perception Layer" est en charge de l'intégration des dispositifs IoT dans l'environnement. En fonction de l'application, les objets sont constitués de différents capteurs et actionneurs à travers lesquels ils perçoivent le milieu physique environnant et interagissent avec lui.
- La couche 2 ou "Network Layer" est responsable du support réseau. Elle offre aux objets la possibilité de communiquer entre eux et de créer des liens afin de transférer des données aux serveurs d'applications.
- La couche 3 ou "Service layer" est responsable des données et de la structuration des services fournis aux clients. Elle assure le stockage, le traitement et l'analyse des données, mais également la sécurité, la modélisation des processus métier et le contrôle des équipements du réseau IoT.
- La couche 4 ou "Application Layer" fournit des méthodes interactives aux clients. Elle offre la possibilité aux êtres humains d'avoir accès aux données provenant du milieu et d'interagir avec lui à travers le réseau d'objets connectés. Cette fonctionnalité s'appuie sur l'analyse des données fournies par la couche 3.

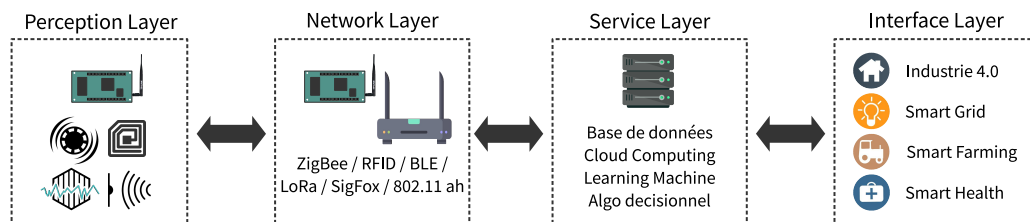


FIGURE 1.1 – Modélisation en quatre couches d'un réseau IoT.

En résumé, un réseau IoT est composé d'un ou plusieurs objets connectés qui transmettent des données à des serveurs afin qu'ils en réalisent l'analyse et le traitement. L'architecture physique d'un réseau IoT est représentée sur la figure 1.2. D'un côté, des objets réalisent des mesures physiques et interagissent avec leurs environnements. De l'autre, une plateforme de serveurs administre les objets connectés, stocke, corrèle et analyse les données reçues pour fournir des services aux clients. La passerelle fait le lien entre le réseau d'objets connectés et les serveurs.

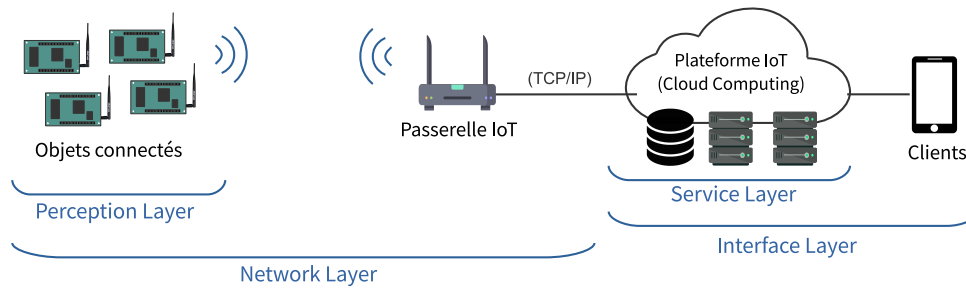


FIGURE 1.2 – Architecture physique d'un réseau IoT.

Une solution IoT exige la mise en œuvre de nombreux dispositifs, nécessite des applications et des protocoles de communication spécialisés. Les capacités de stockage et de traitement des données sont des paramètres qui doivent également être pris en compte [72].

1.2.2 L'objet connecté ou le capteur/actionneur IoT (Niveau 1)

L'Architecture et les fonctionnalités du dispositif IoT

Par définition, un réseau IoT est constitué d'objets communicants, coordonnés entre eux pour réaliser des tâches collaboratives. Les fonctionnalités de base d'un objet connecté sont représentées sur la figure 1.3 [71]. D'un côté, des capteurs et/ou des actionneurs lui permettent d'interagir avec son environnement. De l'autre, un émetteur-récepteur radio lui permet de transmettre des données et de communiquer avec les autres équipements du réseau. La partie "intelligence" est constituée d'un microcontrôleur (ou d'un microprocesseur) et de mémoire. Elle est utilisée pour réaliser des tâches plus ou moins complexes et stocker temporairement des données. Enfin, le circuit de gestion des ressources en énergie sert à contrôler et à réguler la consommation énergétique de l'objet. Dans un réseau, les objets sont souvent identiques, ils sont donc produits en nombre afin de réduire les coûts de fabrication. De plus, les circuits électroniques doivent être suffisamment petits pour être intégrés dans les objets physiques et disposer d'un minimum de ressources pour exécuter les tâches pour lesquelles ils ont été créés.

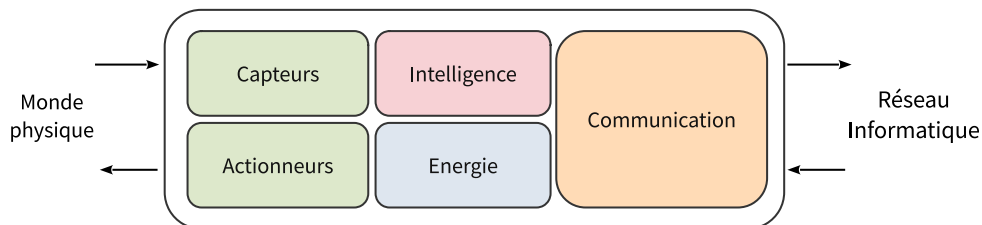


FIGURE 1.3 – Architecture physique d'un objet connecté.

La mémoire RAM (*Random Access Memory*) sert à stocker les données temporaires et la mémoire *flash* le système d'exploitation et les applications logicielles. Les objets sont limités en puissance de calcul et en mémoire afin d'optimiser la taille et la consommation d'énergie. Selon la norme IETF RFC-7228 (*Requests For Comments*), les dispositifs IoT peuvent être classés en trois catégories [73] :

- Un équipement de classe 0 est très contraint en ressources. Il dispose de moins de 10 Ko de RAM et 100 Ko de *flash*. Il est impossible d'y installer une pile protocolaire complète, il ne peut donc pas communiquer directement sur Internet et a nécessairement besoin d'une passerelle pour le faire. Ces équipements servent le plus souvent à acquérir et à transmettre de faibles quantités de données à intervalles réguliers.
- Un équipement de classe 1 est moins contraint en ressources. Il dispose d'environ 10 Ko de RAM et 100 Ko de *flash*. Il peut embarquer une pile protocolaire et communiquer directement sur Internet, mais en utilisant des protocoles adaptés aux faibles ressources. Les passerelles servent à ré-encapsuler les données dans des protocoles non contraints à destination des serveurs d'applications.
- Un équipement de classe 2 est peu ou non contraint en ressources. Il dispose d'au moins 50 Ko de RAM et 250 Ko de *flash*. Il peut prendre en charge une pile protocolaire complète avec tous les mécanismes de sécurité et exécuter des systèmes d'exploitation.

Les objets LoRa/LoRaWAN que nous utiliserons par la suite sont de classe 0, et les objets 802.11ah de classe 1 lorsqu'ils fonctionnent en mode *standalone* et de classe 2 lorsqu'ils fonctionnent avec une carte Raspberry Pi en mode *host*.

La consommation énergétique des dispositifs IoT

Les dispositifs IoT sont alimentés par des sources d'énergie aux capacités limitées et peu fiables. La durée de vie de l'objet dépend directement de cette alimentation. La problématique est critique et nécessite une gestion efficace.

Un dispositif IoT opère par cycle de fonctionnement, l'énergie qu'il consomme correspond au temps passé dans chaque état. A l'état de veille (*idle*), l'émetteur-récepteur est alimenté mais il ne transmet et ne reçoit pas de données. En écoute active (*reception*) et en transmission (*transmission*), l'émetteur-récepteur est alimenté, il reçoit ou transmet des données. Durant ces phases de fonctionnement, les systèmes de traitement et de gestion du dispositif sont actifs, mais l'émetteur-récepteur est le principal consommateur d'énergie. Dans un état de sommeil (*sleep*), l'émetteur-récepteur est éteint, mais les autres fonctionnalités de l'objet sont activées. Dans un état de sommeil profond (*deep sleep*), l'émetteur-récepteur est éteint, de même que les autres fonctionnalités de l'objet. La sortie d'un état de sommeil profond se fait grâce à un circuit de

gestion des interruptions (*Wake-up Interrupt Controller* ou WIC) qui est le seul à toujours être alimenté et qui consomme une très faible quantité d'énergie. Les interruptions sont faites sur horloge interne ou via un signal sur une entrée GPIO (*General Purpose Input/Output*). Durant la phase de réveil (*wake-up*), le dispositif alimente ces différents composants, charge éventuellement le système d'exploitation et les données en mémoire. A la suite d'un réveil, le dispositif réalise des tâches de mesure, des actions sur son environnement ou passe le circuit de communication dans un des états actifs afin de transmettre ou recevoir des données.

Pour réduire la consommation énergétique, il faut donc maintenir le dispositif, le plus longtemps possible, dans un état de sommeil, voire de sommeil profond. Plus la période d'inactivité est importante, plus la quantité d'énergie économisée est importante. Cependant, la réactivité du dispositif et le risque de perte de données augmentent avec l'allongement des temps d'inactivité.

1.2.3 Les réseaux de collecte de données (Niveau 2)

L'objectif des réseaux IoT est de connecter les objets aux serveurs distants, de fluidifier et d'adapter les communications, tout en réduisant la consommation d'énergie des équipements et en assurant la fiabilité des transmissions. L'IoT a fait émerger de nouveaux protocoles de communication, spécialement conçus pour répondre à ces contraintes et défis. Une description de ces protocoles est réalisée par la suite. L'objectif de cette partie est de présenter les caractéristiques qui permettront de les comparer.

Les différentes tailles

Plusieurs technologies de réseaux sans fil ont été développées pour des cas d'utilisation spécifiques. Ces technologies peuvent être différenciées par leur taille ou leur portée de transmission [69, 71] :

- Les réseaux WBAN (*Wireless Body Area Network*) intègrent des dispositifs communicants à l'intérieur ou en surface du corps humain, sous la forme d'accessoires ou d'implants. Ce type de réseaux répond majoritairement aux cas d'utilisation de l'*e-health*.
- Les réseaux WPAN (*Wireless Personal Area Network*) sont destinés aux communications à courte portée, telles que la connexion d'un smartphone à un casque ou une enceinte. La portée de ce type de réseau va de quelques centimètres à quelques mètres. Les technologies WPAN sont réputées pour être à faible débit, économes en énergie, et ont un coût limité.
- Les réseaux WLAN (*Wireless Local Area Network*) couvrent une surface équivalente à une résidence ou un bâtiment. Ils offrent des débits plus importants pour un coût énergétique et une complexité également plus importants. Les WLAN couvrent les cas d'usage de la *Smart Home* et de l'*Industry 4.0*.
- Les réseaux WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) et WNAN (*Wireless Neighborhood Area Network*) sont destinés aux communications avec une portée plus importante

- que les réseaux locaux, campus ou agglomération pour les WMAN, quartier ou rue pour les WMAN. Ces réseaux sont calibrés pour les besoins de la *smart city* et des *smart grid*.
- Enfin, les réseaux WWAN (*Wireless Wide Area Network*) ont été conçus pour couvrir des zones géographiques conséquentes, agglomération, région, pays. On peut y différencier les réseaux cellulaires des réseaux LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Les premiers sont destinés aux applications à haut débit, pour un coût important et une forte consommation énergétique. Les seconds ont été pensés pour des applications à longue portée, un coût et une empreinte énergétique très faibles.

Les topologies physiques

Les réseaux IoT ne répondent pas à une topologie physique particulière, mais on retrouve majoritairement des réseaux en étoile et des réseaux maillés. Une topologie en étoile simplifiera le fonctionnement et le déploiement des nœuds là où une topologie maillée favorisera la fiabilité des communications et l'évolution de la couverture géographique. Il existe également des topologies hybrides, mêlant le maillage en étoile de plusieurs réseaux aux technologies différentes. La figure 1.4 présente une structure de réseau en étoile et une structure de réseau maillé.

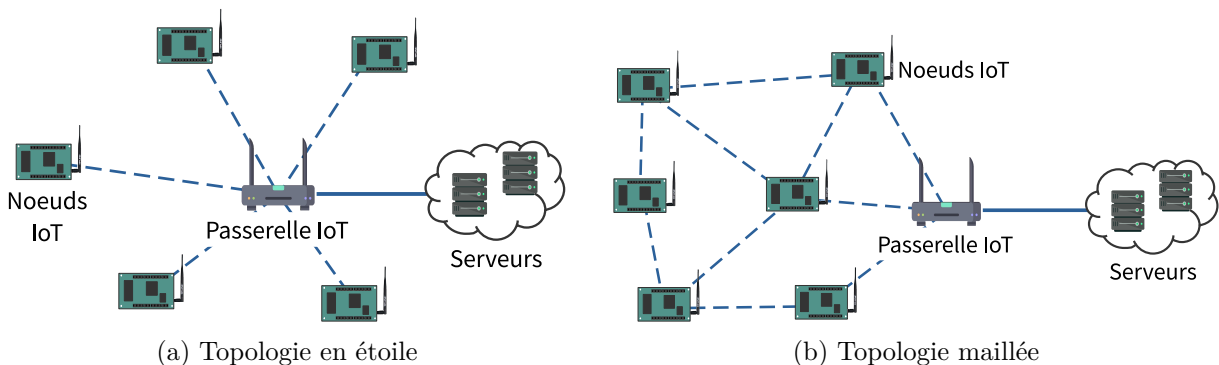


FIGURE 1.4 – Topologies généralement mises en œuvre dans un réseau IoT.

Dans un réseau en étoile, la passerelle se trouve au centre et tous les nœuds y sont connectés. Les messages envoyés par les objets passent par la passerelle qui opère un transfert de protocole à destination des serveurs. Cette topologie facilite la mise en œuvre, la mobilité, la gestion et la maintenance des nœuds IoT. La défaillance de l'un d'entre eux n'affecte pas le reste du réseau.

Dans un réseau maillé, les nœuds communiquent entre eux sans passer par la passerelle. Cette topologie offre de nombreux avantages car les différents liens favorisent les transmissions simultanées, la mise à l'échelle, une tolérance aux pannes et une couverture géographique plus importante. Les nœuds doivent cependant disposer de fonctionnalités de routage, ce qui augmente leur complexité et leur consommation d'énergie.

Dans un réseau hybride, une partie est maillée et l'autre organisée en étoile. L'hybridation va

servir à créer un réseau où la collecte fiable des données est réalisée avec une topologie maillée et la collecte des autres données avec une topologie en étoile. Il est également possible d’imaginer un réseau maillé où des équipements reliés à une source d’énergie fiable serviraient de puits de collecte à des objets disséminés en étoile, couvrant ainsi une plus large zone géographique.

Les flux de données

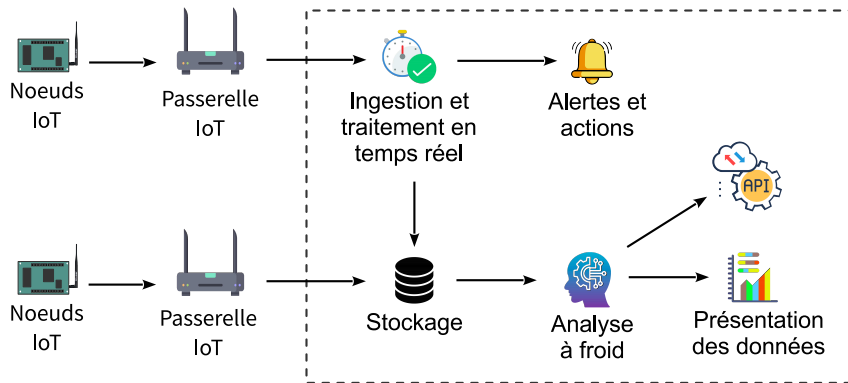
Les échanges de données dans les réseaux IoT peuvent être en liaison montante ou descendante, avec des disparités en fonction du type de réseau et de l’application. Un réseau WSN (*Wireless Sensor Network*) aura majoritairement des échanges en provenance des capteurs et à destination des serveurs. Un réseau WSA (*Wireless Sensor Actuator Network*) aura majoritairement des échanges dans l’autre sens. Ces flux de données peuvent être générés par des événements (*event-driven*), des requêtes (*event-query*) ou par un trafic en continu. Enfin, les dispositifs peuvent émettre périodiquement ou en rafale. La transmission de données en rafale fait référence à une période pendant laquelle un dispositif envoie à intervalles irréguliers et rapprochés des données avant de retourner dans un état de veille ou de sommeil. Les transmissions périodiques sont plus facilement modélisables, de par leur caractère régulier.

Les critères de performances

Les performances d’un réseau IoT sont évaluées avec les mêmes métriques que les réseaux classiques [70]. L’importance de ces métriques varie en fonction du cas d’usage. Nous définissons le débit de données comme le nombre de bits que l’équipement transmet par seconde. Nous ferons une différence entre le débit physique et le débit utile. La latence est le nombre de secondes que met le premier bit pour aller de la source à la destination. La gigue (ou *jitter*) est la variation de la latence ou du délai de transmission. La charge maximale est la quantité de données qu’un équipement peut transmettre par trame. Enfin, nous considérons l’efficacité énergétique comme la quantité moyenne d’énergie consommée pour envoyer avec succès un bit d’information. Cette efficacité est obtenue en divisant l’énergie consommée par le débit moyen.

1.2.4 La plateforme IoT et les services Cloud (Niveau 3 et 4)

Les dispositifs IoT sont souvent trop légers pour analyser eux-mêmes la quantité de données qu’ils produisent. Ils ont donc besoin d’une solution dédiée et déportée. La plateforme IoT concentre l’intelligence du système. Son rôle est de stocker, de traiter et d’analyser les données. En général, les plateformes IoT sont responsables de l’agrégation des données collectées par les divers équipements et leur translation vers les services applicatifs. De manière simple, la figure 1.5 présente les fonctionnalités fournies par une plateforme dans un réseau IoT. Ces services correspondent aux niveaux 3 et 4 de la modélisation présentée dans la partie 1.2.1.

FIGURE 1.5 – Services fournis par une plateforme *Cloud* dans un réseau IoT.

Les données, collectées au niveau de la couche 2, sont soit directement stockées pour une utilisation et une analyse à froid, soit regroupées et traitées en temps réel pour générer à chaud des actions et des alertes. L'analyse à froid est réalisée par des algorithmes d'apprentissage automatique ou plus simplement des scripts. Une plateforme IoT fournit également des API (*Application Programming Interface*) aux applications pour réaliser la présentation des données. Certaines fonctionnalités ne sont pas représentées sur la figure 1.5, telles que la sécurité et les outils de gestion des équipements.

En raison de la grande variété d'applications, les plateformes IoT sont souvent uniques dans leur conception. Elles n'intègrent pas forcément toutes les fonctionnalités décrites à la figure 1.5. Certaines plateformes ne traitent que les données à froid, et d'autres uniquement les données à chaud. L'analyse des données peut être optionnelle, les API différentes. Avec une topologie *hub*, les services de niveau 3 et 4 sont proposés en local sur des serveurs de l'entreprise. Avec une topologie *cloud*, ils sont sur Internet, le plus souvent dans des *data center*. Enfin, la topologie *hybride* offre un mélange des deux solutions. L'architecture peut également différer en fonction des besoins et des compétences disponibles dans l'entreprise. Avec une solution *IaaS* (*Infrastructure as a Service*), la plateforme fournit les infrastructures réseaux (routeurs, pare-feu, etc), les serveurs, les espaces de stockage et tous les systèmes périphériques nécessaires au bon fonctionnement (alimentation en énergie, refroidissement, etc). Avec une solution *PaaS* (*Platform as a Service*), la plateforme fournit également les systèmes d'exploitation des serveurs (virtualisation, conteneur, etc) et une partie des fonctionnalités présentées sur la figure 1.5 (outils de développement, base de données, scripts de traitement, algorithmes d'apprentissage, etc). Enfin, une solution *SaaS* (*Software as a Service*) y ajoutera le développement et la maintenance des applications métiers.

Pour bon nombre d'applications, la durée d'envoi des données de l'objet physique au centre distant ne pose pas de problème. Dans le cas où ce délai serait considéré comme trop important,

des solutions existent pour déporter une partie des fonctionnalités à proximité des objets physiques. La figure 1.6 présente trois topologies de ce type. Avec le *mist computing*, une partie du traitement des données est réalisée par le nœud lui-même, le résultat est ensuite transmis à la plateforme. Avec le *edge computing*, un dispositif périphérique situé à une distance relativement proche des objets physiques réalise une partie du traitement et envoie une agrégation des résultats de ce traitement à la plateforme *cloud*. Avec le *fog computing*, un pré-traitement est réalisé par la passerelle ou une partie des serveurs qui peuvent être déportés au plus près des objets.

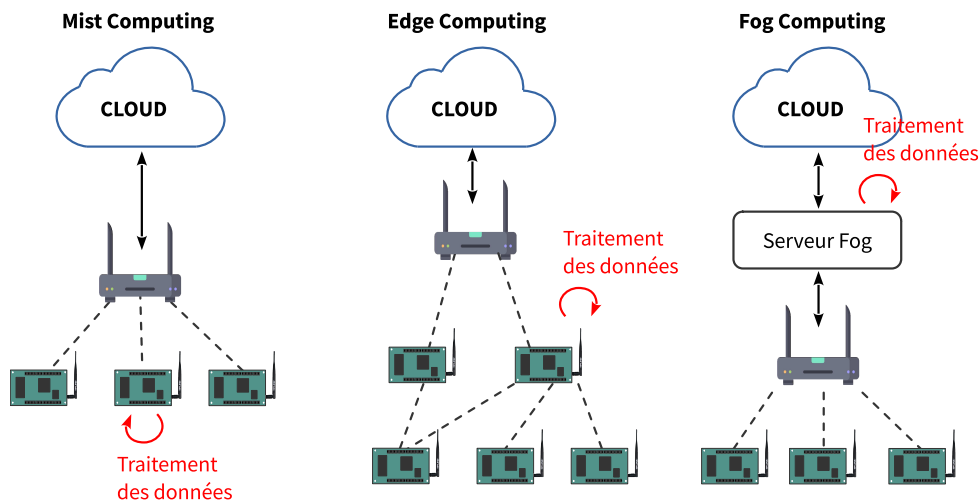


FIGURE 1.6 – Architecture des solutions Mist / Edge et Fog Computing.

Pour conclure, une plateforme IoT concentre les services nécessaires à la manipulation massive des données qui seront générées par les objets connectés. Les fonctionnalités offertes par ces solutions font partie de la "révolution IoT", au même titre que les réseaux d'objets.

1.3 Les protocoles de communication pour l'IoT

L'IETF a proposé une révision de sa pile protocolaire afin de l'adapter à un environnement contraint. Les protocoles de communication classiques ne répondent pas aux défis de l'IoT, ce qui a entraîné la modification ou le développement de nouveaux protocoles. On peut les classer dans deux catégories : les protocoles de traitement de l'information qui correspondent aux couches hautes du modèle OSI et les protocoles de transport de l'information qui correspondent aux couches basses. Les solutions sont nombreuses, nous avons choisi de ne présenter que les plus communément rencontrés.

1.3.1 Les protocoles de traitement de l'information pour l'IoT

La gestion des données par les plateformes IoT est cruciale et dépend du protocole de traitement de l'information utilisé. La collecte s'effectue au niveau applicatif et selon deux approches. Avec le modèle "éditeur/abonné", des dispositifs publient leurs données auprès d'un serveur et d'autres dispositifs s'abonnent à ces données. "L'éditeur" et "l'abonné" ne communiquent jamais directement, les échanges sont toujours réalisés à travers le serveur et en fonction des abonnements. Avec le modèle "requête/réponse", un dispositif fonctionnant comme un client se connecte périodiquement à un autre dispositif fonctionnant comme un serveur, pour demander un service ou des données. Le serveur répond en fournissant ce service ou des données [9, 68, 71, 72].

Le protocole CoAP - Un modèle requête/réponse

Le protocole CoAP (*Constrained Application Protocol*) (RFC-7252) remplit les fonctions des couches 5 et 6 de la modélisation OSI (*Open Systems Interconnection*). Il s'appuie sur le protocole UDP (*User Datagram Packet*) en couche 4. Son empreinte mémoire est faible et il peut optionnellement utiliser le mécanisme de chiffrement DTLS (*Datagram Layer Transport Security*). Très similaire au protocole HTTP (*HyperText Transfer Protocol*), le protocole CoAP est basé sur une API REST (*REpresentational State Transfer*). Il utilise quatre types de requête : GET pour récupérer la ressource, POST pour demander son traitement, PUT sa mise à jour et DELETE sa suppression [74, 75]. Le protocole CoAP utilise des messages compacts et asynchrones qui occupent l'espace d'un datagramme UDP. Les "requêtes/réponses" sont transmises avec deux types de messages et selon deux types d'échanges, représentées sur la figure 1.7.

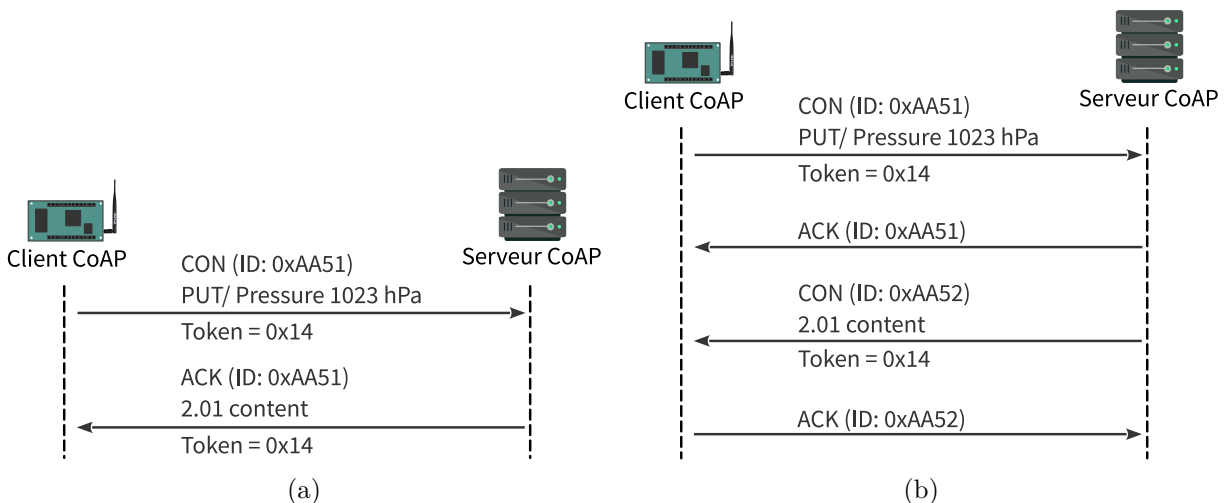


FIGURE 1.7 – Exemple d'un échange immédiat (a) et d'un échange différé (b) en CoAP.

Un message "confirmé" est un message fiable. Il est obtenu en utilisant une requête spécifique (CON) qui demande une confirmation (*ACKnowledgment* ou ACK). Un message "non confirmé"

(NON) est un message peu fiable. Il ne nécessite pas d'accusé de réception. Il est généralement utilisé pour transmettre des données non critiques. Sur la figure 1.7(a), la requête est un message (CON) et la réponse à cette requête contient les informations et l'accusé de réception (ACK). Sur la figure 1.7(b), la requête est accusée en réception avant l'envoi de la réponse, qui est elle-même accusée en réception de manière indépendante. Un identifiant (ID ou *IDentifier*) est utilisé pour éviter les doublons et faire le lien entre le message (CON) et son accusé de réception (ACK). Le champ *Token* sert à associer la requête et la réponse contenant les informations [74, 75].

En résumé, le protocole CoAP est simple à mettre en œuvre. Son empreinte logicielle et sa faible bande passante en font un outil idéal pour les équipements avec peu de ressources. Différentes solutions implémentent ce protocole dans un écosystème complet [76].

Le protocole MQTT - Un modèle éditeur/abonné

Le MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) est un protocole de transport de messagerie, réputé pour être léger, ouvert et facile à mettre en œuvre. Il est agnostique en matière de données. Il gère les sessions, offre une qualité de service et une optimisation de la consommation énergétique. La figure 1.8 représente un échange MQTT entre un "éditeur", un serveur et un "abonné". Le serveur (ou *broker*) est chargé de recevoir tous les messages, de les filtrer et de déterminer les abonnés. Il détient également des informations sur les sessions, leurs persistance et la liste des messages manqués.

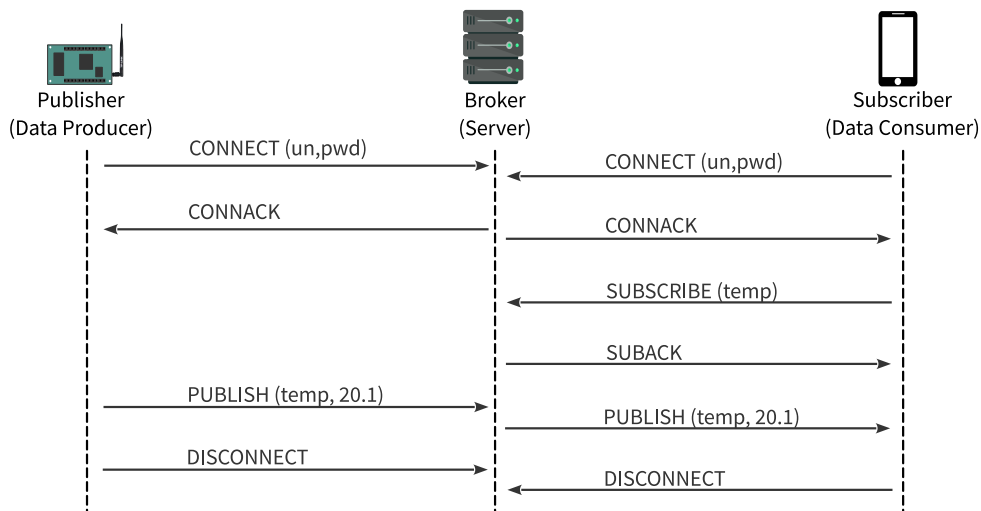


FIGURE 1.8 – Exemple d'un échange *Publish/Subscribe* en MQTT.

Une session MQTT est divisée en trois étapes. Les clients "éditeur" ou "abonné" commencent par se connecter au *broker*. Cette connexion peut donner lieu à un échange de mots de passe ou de certificats à travers un lien chiffré. Au cours de la phase de communication, le client "éditeur"

publie auprès du *broker* des données sur un sujet défini. De son côté, le client "abonné" recevra les données de la part du *broker* seulement s'il s'est abonné à ce sujet. Les abonnements sont réalisés au moyen d'une paire de paquets *subscribe/suback*. Le désabonnement est réalisé de manière similaire à l'aide d'une paire de paquets *unsubscribe/unsuback*. Enfin, un client peut maintenir une connexion active et s'assurer qu'elle n'a pas été interrompue par une passerelle ou un routeur en envoyant un *ping*. Lorsqu'un "éditeur" ou un "abonné" souhaite mettre fin à une session, il envoie un message *disconnect* au *broker*.

Malgré toutes ces qualités, le protocole MQTT souffre d'un défaut majeur. Il fonctionne avec le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*) en couche 4. TCP est robuste et fiable mais très consommateur en bande passante, ce qui ne convient pas aux équipements contraints en ressources. Des solutions ont été proposées, pour adapter le protocole MQTT aux transmissions IoT. Le projet MQTT-SN (*MQTT-Sensor Network*) est un exemple qui a pour objectif d'adapter le protocole MQTT sur une couche UDP, voire même directement sur la couche MAC (*Media Access Control*) [77].

Les autres modèles éditeur/abonné

D'autres protocoles ont été spécifiquement développés pour les domaines de l'IoT. Ils respectent généralement le modèle "éditeur/abonnés" [71]. AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*) est un standard ouvert orienté message. Il fonctionne avec des files d'attente et stocke les messages jusqu'à ce qu'ils soient transmis au destinataire. Il gère la fiabilité en garantissant la livraison des messages avec des indicateurs de fréquence. AMQP s'appuie sur le protocole TCP en couche 4 [9, 68, 71, 72]. XMPP (*eXtensible Messaging and Presence Protocol*) est un protocole de messagerie normalisé par l'IETF. Il a été optimisé pour transporter des messages de petites tailles, avec une faible latence. XMPP transporte des flux de données XML (*eXtensible Markup Language*), ce qui a un impact fort sur la bande passante du réseau. De plus, le XML nécessite des capacités de traitement élevées et ne garantit pas une qualité de service [9, 68, 71, 72]. DDS (*Data Distribution Service*) est un autre protocole prévu pour réaliser une communication de données haute performance, en temps réel, interopérable, évolutive et fiable. Enfin, le protocole DDS est basé sur une communication décentralisée Peer-to-Peer (P2P). DDS peut fonctionner sur les protocoles de transport TCP et UDP [9, 68, 71, 72].

Nous avons choisi d'utiliser le protocole CoAP sur le banc de test Wi-Fi HaLow, dans un environnement contraint entre le capteur IoT et le serveur lwM2M (*light weight Machine to Machine*). La solution mise en oeuvre sur le banc de test LoRaWAN utilise quant à elle le protocole MQTT, dans un environnement peu contraint entre le serveur de réseau et les serveurs d'applications.

1.3.2 Les protocoles de transport de l'information pour l'IoT

La nécessité de connecter de nombreux équipements sur des zones géographiques étendues a favorisé la prolifération des technologies de communication sans fil. Dans cette partie, nous présentons les protocoles les plus prometteurs et nous donnons une brève description de leurs principales caractéristiques. Certains protocoles ont été spécifiquement développés pour l'IoT. D'autres résultent de modifications de protocoles déjà existants [71].

Les protocoles RFID et NFC

L'identification par radiofréquence (RFC-8371) désigne un ensemble de technologies permettant d'identifier des équipements à l'aide d'étiquettes intelligentes. Un système RFID (*Radio Frequency IDentification*) est composé d'un lecteur qui lit les informations contenues dans des étiquettes. Les lecteurs émettent des ondes électromagnétiques qui alimentent temporairement les étiquettes pour qu'elles fournissent les informations qu'elles contiennent. Les solutions RFID sont nombreuses, plus ou moins élaborées, et peuvent être classées en fonction de la fréquence, de la portée et de l'autonomie des étiquettes. Les transmissions s'effectuent dans de larges bandes de fréquences, allant des basses fréquences (125-134 kHz) aux hautes fréquences (2,4 GHz) en passant par des fréquences intermédiaires (13,56 MHz et 868 MHz). Les distances vont de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres et les débits de quelques kbit/s à quelques dizaines de kbit/s. Les étiquettes les plus simples contiennent un identifiant sur 128 bits et les plus complexes peuvent intégrer un microcontrôleur et des capteurs. Elles sont passives, semi-passives ou actives [78, 79]. Il existe une grande variété de standards, avec des caractéristiques plus ou moins diverses. On les retrouve dans le marquage des vêtements, des valises dans un aéroport ou des animaux dans une exploitation agricole. Le tableau 1.1 contient les principales caractéristiques du protocole RFID.

TABLEAU 1.1 – Caractéristiques physiques du protocole RFID.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	Portée	Puiss. Max. d'émission
125-134 kHz 13,56-868 MHz 2,4 GHz	1,74-10 MHz	0,7-4 Mbit/s	DSSS ¹ , FHSS ²	10-30 m	1,5 mW

¹ *Direct-Sequence Spread Spectrum*, ² *Frequency-Hopping Spread Spectrum*

NFC (*Near Field Communication*) est une technologie de transmission sans appairage et à faible portée entre deux équipements. Son fonctionnement est comparable à celui de la technologie RFID, excepté le fait que les dispositifs NFC peuvent fonctionner en tant que lecteur ou en tant qu'étiquette. La communication s'effectue en mode actif ou passif, avec une portée inférieure à 1 m et un débit binaire de quelques centaines de kbit/s. On retrouve cette technologie

dans les téléphones portables pour effectuer des paiements sans contact ou dans le *smart health* pour le suivi des patients. Le tableau 1.2 contient les principales caractéristiques du protocole NFC [78, 80].

TABLEAU 1.2 – Caractéristiques physiques du protocole NFC.

Bande RF	Débit binaire	Modulation	Codage	Portée	Nombre de nœuds	Puiss. Max. d'émission
13,56 MHz	106 kbit/s 212 kbit/s 424 kbit/s	ASK ¹ BPSK ² OOK ³	NRZ ⁴ -L Manchester Miller	10 cm	2	23 dBm

¹ Amplitude Shift Keying, ² Binary Phase Shift Keying, ³ On-Off Keying, ⁴ Non Return to Zero

Le protocole Bluetooth Low Energy

Le Bluetooth est un protocole de communication à courte portée conçu à l'origine pour offrir une alternative peu coûteuse au Wi-Fi. Sa variante BLE (*Bluetooth Low Energy*) a été développée pour les applications nécessitant une faible consommation d'énergie. L'architecture et la pile protocolaire du BLE sont différentes de celles du Bluetooth, rendant ces deux protocoles incompatibles. Le protocole BLE est constitué d'une infinité d'hôtes (ou esclaves) connectés en étoile à un contrôleur (ou maître). Les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux et ils sont connectés à un seul maître. Le protocole BLE fonctionne dans la bande des 2,4 GHz et définit 40 canaux avec une bande passante de 2 MHz [78, 81]. Les principales caractéristiques de la couche physique du protocole BLE sont présentées dans le tableau 1.3.

TABLEAU 1.3 – Caractéristiques de la couche physique du protocole BLE.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI ¹	Puiss. Max. d'émission
2,4 GHz	1-2 MHz	125-500 kbit/s 1-2 Mbit/s	GFSK ² FHSS	-70 dBm	20 dBm

¹ Received Signal Strength Indicator, ² Gaussian Frequency Shift Keying

La couche "liaison de données" gère l'établissement et le maintien des liens logiques entre les appareils, l'authentification, le chiffrement des messages et la négociation de la taille des paquets. La communication entre deux dispositifs est bidirectionnelle mais la connexion est asymétrique. Un équipement qui souhaite transmettre des données doit l'annoncer sur un canal spécifiquement réservé à cet usage. Après acceptation, les données sont transmises sur un autre canal. Le protocole BLE ne décrit pas uniquement les couches d'accès au réseau, mais une pile protocolaire complète [78, 82]. Les couches supérieures servent à gérer la relation client/serveur et à décrire la structure et le transfert des données.

À des fins d'économie d'énergie, les esclaves sont toujours en mode veille et se réveillent périodiquement pour éventuellement recevoir des messages du maître. Le maître détermine les moments où les esclaves doivent écouter et coordonne ainsi l'accès au support en utilisant une méthode TDMA (*Time Division Multiplexing Access*). Le débit binaire au niveau de la couche physique est de 2 Mbit/s et 236,7 kbit/s au niveau de la couche application [78, 81, 83]. Les principales caractéristiques de la couche MAC sont synthétisées dans le tableau 1.4.

TABLEAU 1.4 – Caractéristiques de la couche MAC du protocole BLE.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
TDMA	256 octets	AES-128 ¹	5 917	48 bits (Dev ID)	1	2,5 ko (RAM) 40 ko (ROM ²)

¹ *Advanced Encryption Standard*, ² *Read Only Memory*

La norme 802.15.4

La norme IEEE 802.15.4 définit les couches physique (PHY) et MAC pour des réseaux WPAN à faible débit. Cette norme est notamment utilisée par les protocoles de couches supérieures ZigBee et 6LoWPAN. La pile protocolaire est réputée pour être simple et flexible, offrant un faible coût, une faible consommation d'énergie, une courte portée, un transfert de données fiable et une facilité d'utilisation. En Europe, la norme 802.15.4 propose un canal de transmission dans la bande des 868 MHz et 16 canaux dans la bande des 2,4 GHz, pour des débits de 20 et 250 kbit/s. Le tableau 1.5 contient les principales caractéristiques de la couche physique du protocole IEEE 802.15.4 [71, 78, 84, 85].

TABLEAU 1.5 – Caractéristiques de la couche PHY de la norme 802.15.4.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI	Puiss. Max. d'émission
868 MHz 2,4 GHz	0,3 MHz 2 MHz	20 kbit/s 250 kbit/s	BPSK, O-QPSK ¹ DSSS	-92 dBm -85 dBm	0-23 dBm

¹ *Quadrature Phase Shift Keying*

Un réseau 802.15.4 est constitué d'un coordinateur et d'équipements (les RFD ou *Reduced Function Device*), qui peuvent contenir des fonctionnalités de routage (les FFD ou *Full Function Device*). En fonction des équipements, la norme propose deux topologies. Avec la topologie étoile, les RFD sont connectés au coordinateur et ne communiquent pas directement ensemble. Avec la topologie maillée, les RFD et les FFD sont connectés au coordinateur mais les FFD peuvent router les messages des RFD. La couche MAC définit également deux méthodes d'accès au média : une méthode coordonnée (*Slotted CSMA/CA*) et une méthode non coordonnée (*Unslotted CSMA/CA*). Avec la méthode coordonnée, le coordinateur structure la communication sous la

forme d’une super-trame encadrée par des trames balises. Cette super-trame est constituée par des créneaux temporels d’accès au média. Les équipements transmettent leurs données dans ces créneaux, avec ou sans contention. Avec la méthode non coordonnée, tous les nœuds accèdent au support en utilisant la technique CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) et le coordinateur envoie une balise uniquement lorsqu’un nœud le demande. Des évolutions ont permis d’améliorer la latence et la consommation énergétique (802.15.4e), ou la portée de transmission (802.15.4g). Le tableau 1.6 contient les caractéristiques de la couche MAC du protocole 802.15.4 [71, 78, 84, 85].

TABLEAU 1.6 – Caractéristiques de la couche MAC de la norme 802.15.4.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
(Un)Slotted CSMA/CA	127 octets	AES-128	65 535	16/64 bits (MAC)	30	3,6 ko (RAM) 24 ko (ROM)

Le protocole Wi-Fi HaLow

La norme IEEE 802.11ah est une variante du protocole Wi-Fi, qui a été spécialement développée pour l’IoT. Au niveau de la couche PHY, les transmissions sont réalisées dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz, afin d’augmenter la portée et minimiser la consommation d’énergie. Cette norme a suivi l’évolution du Wi-Fi et utilise la modulation OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*) en couche physique. Le débit de données varie de 150 kbit/s à 346,7 Mbit/s et la portée de transmission peut atteindre 1 km. Cette norme offre également la possibilité d’exploiter la diversité spatiale avec un schéma d’antennes MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) en liaison montante et DL MU-MIMO (*DownLink Multi-User MIMO*) en liaison descendante [78, 86, 87]. La puissance maximale autorisée est de 14 dBm en Europe et 30 dBm aux États-Unis. Le tableau 1.7 contient les principales caractéristiques physiques du protocole 802.11ah [78].

TABLEAU 1.7 – Caractéristiques de la couche physique du protocole Wi-Fi HaLow.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI	Puiss. Max. d’émission
EU-868 US-913	1-16 MHz	0,15-346,7 Mbit/s	BPSK, QPSK, QAM ¹ OFDM, MIMO	-98 dBm	14 dBm 30 dBm

¹ Quadrature Amplitude Modulation

Un réseau Wi-Fi est constitué d’un point d’accès (*Access Point* ou AP) autour duquel sont connectés des stations. La topologie peut être en étoile, maillée ou point à point. Au niveau de la couche MAC, le Wi-Fi HaLow utilise la technique d’accès au média CSMA/CA. Il intègre

également de nouveaux mécanismes pour augmenter le nombre de stations prises en charge et minimiser la consommation d'énergie. Le mécanisme RAW (*Restricted Access Window*) offre une équité d'accès au média en affectant des créneaux temporels à des groupes de stations. Le mécanisme TWT (*Target Wake Time*) minimise la consommation énergétique en optimisant les périodes de réveil des stations. La structure de l'AID (*Association Identifier*) et le mécanisme TIM (*Target Indication Map*) ont été modifiés afin de gérer en théorie jusqu'à 8 191 stations [86, 87]. Enfin, l'empreinte des trames de contrôle est minimisée par la suppression de l'entête MAC. La norme 802.11ah s'intègre dans la pile protocolaire TCP/IP (*Transport Control Protocol/Internet Protocol*) et offre des mécanismes de sécurité évolués. Le tableau 1.8 contient les principales caractéristiques de la couche MAC du protocole Wi-Fi HaLow.

TABLEAU 1.8 – Caractéristiques de la couche MAC du protocole Wi-Fi HaLow.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
CSMA/CA	2 346 octets	WPA ¹	8 191	48 bits (MAC)	1	8 ko (RAM) 128 ko (Flash)

¹ *Wi-Fi Protected Access*

Le protocole NB-IoT

Les défis de l'IoT et des communications M2M (*Machine to Machine*) ont été ajoutés aux spécifications du LTE (*Long Term Evolution*). Dans la version 13 de la norme 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), deux nouvelles catégories ont été proposées, le CAT-M et le NB-IoT (*Narrow Band-IoT*). Ces deux normes utilisent les infrastructures des réseaux cellulaires pour offrir une connectivité aux applications IoT. Le standard NB-IoT a été conçu pour supporter des équipements avec des exigences de portée, de faible complexité et de consommation d'énergie. Au niveau de la couche physique, une transmission NB-IoT occupe une bande passante de 180 kHz. Douze canaux peuvent être implémentés dans le spectre d'une communication cellulaire. En mode autonome, les douze canaux occupent le spectre qui n'est pas utilisé. En bande de garde, les canaux sont positionnés à côté du spectre des communications cellulaires, sans réservation de ressources. En bande, une partie du spectre LTE est réservée en ressources pour le NB-IoT. Les débits peuvent atteindre 250 kbit/s et les communications sont réalisées en *half-duplex*. Le NB-IoT utilise une modulation OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en liaison montante et SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en liaison descendante [88, 89]. Le tableau 1.9 contient les principales caractéristiques d'une solution NB-IoT.

En terme d'accès au réseau, le NB-IoT utilise les mêmes techniques que les réseaux cellulaires et intègre des mécanismes de réduction de la consommation d'énergie. Les communications

TABLEAU 1.9 – Caractéristiques de la couche physique du protocole NB-IoT.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI	Puiss. Max. d'émission
Bandes cellulaires	180 kHz	20-250 kbit/s	OFDMA (ul) SC-FDMA (dl)	-95 dBm (ul) -105 dBm (dl)	23 dBm

ul : uplink (liaison montante), dl : downlink (liaison descendante)

descendantes sont multiplexées en temps, découpées en trames de 10 ms et en sous-trames d'1 ms. Elles sont composées de trois canaux et trois signaux LTE. Les signaux sont utilisés pour effectuer la synchronisation temporelle et fréquentielle, la détection des cellules et fournir une référence de phase dans la démodulation des canaux de données. Les canaux fournissent des informations sur la cellule, indiquent l'ordonnancement des messages et contiennent les données. En liaison montante, la communication est composée de deux canaux LTE. Ils permettent à l'équipement de demander la connexion en accès aléatoire et d'échanger les données [88, 89]. Le tableau 1.10 contient les principales caractéristiques d'accès au réseau d'une solution NB-IoT.

TABLEAU 1.10 – Caractéristiques de la couche MAC de la solution NB-IoT.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
Slotted Aloha	1600 octets	128-EEA ¹ 128-EIA ²	∞	3GPP ³	1	32 ko (RAM) 256 ko (Flash)

¹ Evolved packet system Encryption Algorithms, ² Evolved packet system Integrity Algorithms

Le protocole LoRa/LoRaWAN

Le protocole LoRa/LoRaWAN est une solution LPWAN qui limite la consommation énergétique des dispositifs en transmettant de faibles quantités de données à des débits réduits. Le LoRa définit une technique de modulation par étalement de spectre qui favorise la robustesse des communications et facilite la réception pour des équipements à faible coût. Les transmissions sont réalisées dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz, ce qui permet d'augmenter la portée et de réduire la consommation d'énergie. La norme LoRa définit 7 coefficients d'étalement et embarque un code correcteur d'erreurs dans la modulation. En Europe, la bande de fréquence utilisée se situe entre 863 et 870 MHz, avec une bande passante de 125, 250 ou 500 kHz, 8 canaux en liaison montante et un canal réservé exclusivement aux liaisons descendantes. Un équipement LoRa est soumis à un *duty cycle* et doit choisir arbitrairement un canal pour ses transmissions. Le tableau 1.11 contient les principales caractéristiques du protocole LoRa [90-93].

LoRaWAN est une spécification proposée par l'Alliance LoRa qui définit une couche réseau adaptée aux transmissions LoRa. LoRaWAN contrôle le débit et propose trois méthodes d'accès aux média (A, B et C). Avec la classe A, l'équipement sélectionne un canal de manière aléatoire

TABLEAU 1.11 – Caractéristiques de la couche PHY du protocole LoRa.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI	Puiss. Max. d'émission
EU-868 US-913	0,3 MHz (eu) 2,16 MHz (us)	0.25-50 kbit/s	FSK ¹ ,CSS ²	-137 dBm	14 dBm (eu) 23 dBm (us)

eu : Europe, us : United States,

1 *Frequency Shift Keying*, 2 *Chirp Spread Spectrum*

et transmet ses données. Il ouvre ensuite deux fenêtres temporelles pour recevoir un accusé de réception. Avec la classe B, l'équipement ouvre régulièrement des fenêtres de réception jusqu'à la prochaine transmission. Avec la classe C, l'équipement est maintenu en réception jusqu'à la prochaine transmission. La première solution est la plus économe en énergie. LoRaWAN définit également un nombre de répétitions et offre la possibilité aux serveurs d'utiliser les accusés de réception pour transmettre des informations aux dispositifs. Le tableau 1.12 contient les principales caractéristiques du protocole LoRaWAN [65, 92, 94, 95].

TABLEAU 1.12 – Caractéristiques de la couche MAC du protocole LoRaWAN.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
Unslotted Aloha	242 octets	AES-128	∞	32 bits (Dev ID)	1	8 ko (RAM) 128 ko (Flash)

Le protocole SigFox

SigFox est un opérateur de réseau qui propose un protocole de communication pour des applications à très faibles débits. Les transmissions se font en bandes étroites (*Ultra Narrow Band* ou UNB), avec une modulation DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) en liaison montante et GFSK en liaison descendante. Chaque transmission occupe une bande passante de 100 Hz en Europe et 600 Hz aux États-Unis, pour un débit respectif de 100 et 600 b/s. Le tableau 1.13 contient les principales caractéristiques de la couche PHY du protocole SigFox [92].

TABLEAU 1.13 – Caractéristiques de la couche PHY du protocole SigFox.

Bande RF	Bande Passante	Débit binaire	Modulation	RSSI	Puiss. Max. d'émission
EU-868 US-902	100 Hz (eu) 600 Hz (us)	100 bps (eu) 600 bps (us)	DBPSK (ul) GFSK (dl)	-135 dBm	14 dBm (eu) 23 dBm (us)

ul : uplink (liaison montante), dl : downlink (liaison descendante)

eu : Europe, us : United States

La technologie SigFox a été conçue pour être la plus simple possible. Les trames contiennent

peu de données et il n’y a pas de mécanisme d’écoute du médium. Les transmissions sont soumises à un *duty cycle* et un nombre maximum de message par jour. En Europe, les dispositifs peuvent transmettre à 14 dBm pour un maximum de deux secondes d’émission et un total de 140 messages par jour. Les stations de base peuvent transmettre à 26 dBm. Aux États-Unis, les dispositifs peuvent transmettre à 23 dBm pour un maximum de 0,346 seconde d’émission et un total de 140 messages par jour. Les stations de base peuvent transmettre à 30 dBm. Chaque transmission occupe une bande passante étroite, permettant au réseau SigFox d’avoir un grand nombre de transmission en parallèle. Les signaux ont une grande résilience face aux interférences et sont facilement démodulés en masse par les stations de base. La solution Sigfox ne dispose pas de méthode d’accès au support. Les dispositifs transmettent sur une fréquence sélectionnée aléatoirement, puis envoient deux répliques à des fréquences différentes. L’intervalle entre chaque réplique est lui aussi aléatoire. Les messages et les répliques sont identifiés et ordonnancés à l’aide d’un numéro de séquence. Les paquets ont une taille fixe de 26 octets et contiennent 12 octets de données [92]. Le tableau 1.14 synthétise les principales caractéristiques du protocole SigFox.

TABLEAU 1.14 – Caractéristiques d’un réseau SigFox.

MAC	Charge Max.	Sécurité Intégrité	Nombre de nœuds	Adressage	Saut	Mémoire
Unslotted Aloha	12 octets (ul) 8 octets (dl)	AES-128	∞	•	1	8 ko (RAM) 10 ko (Flash)

ul : uplink (liaison montante), dl : downlink (liaison descendante)

1.4 Discussions et conclusion

Les tableaux 1.15 et 1.16 contiennent les valeurs théoriques des principales métriques que nous avons choisi d’utiliser pour comparer les protocoles de communication pour l’IoT. Une définition de ces métriques est fournie dans la partie 1.2.3. Les valeurs proviennent de la littérature [8, 9, 68, 71, 72, 78-89, 96] et dépendent de la situation et de l’architecture du réseau. Par exemple, la latence d’un réseau 802.15.4 varie en fonction de sa topologie et le courant consommé dépend de la portée de transmission. Une carte *Xbee 3* consomme 30 mA pour une transmission à 0 dBm et une carte *Xbee 3 Pro* consomme 140 mA pour une transmission à 20 dBm [84]. Les figures 1.9, 1.10, 1.11 et 1.12 représentent le débit, la latence, la portée et le courant consommé par les protocoles de communication IoT, à partir des valeurs contenues dans les tableaux 1.15 et 1.16.

Les protocoles de transport de l’information pour l’IoT peuvent être classés dans deux catégories. Les protocoles ZigBee, 6LoWPAN et BLE appartiennent à la catégorie des réseaux personnels (WPAN). Les protocoles LoRa, SigFox, NB-IoT, LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*) et 802.11ah appartiennent à la catégorie des réseaux étendus à faible consommation

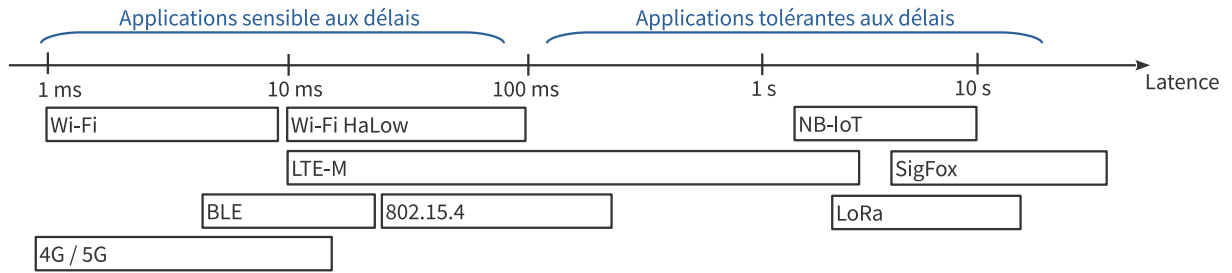


FIGURE 1.10 – Répartition des technologies IoT en fonction de la latence.

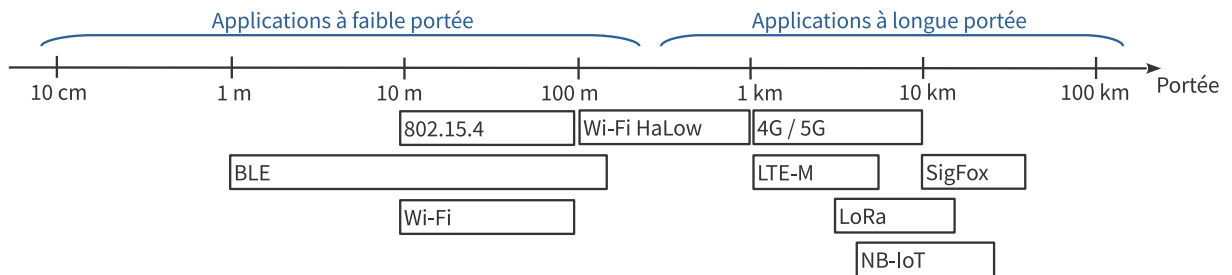


FIGURE 1.11 – Répartition des technologies IoT en fonction de la portée de transmission.

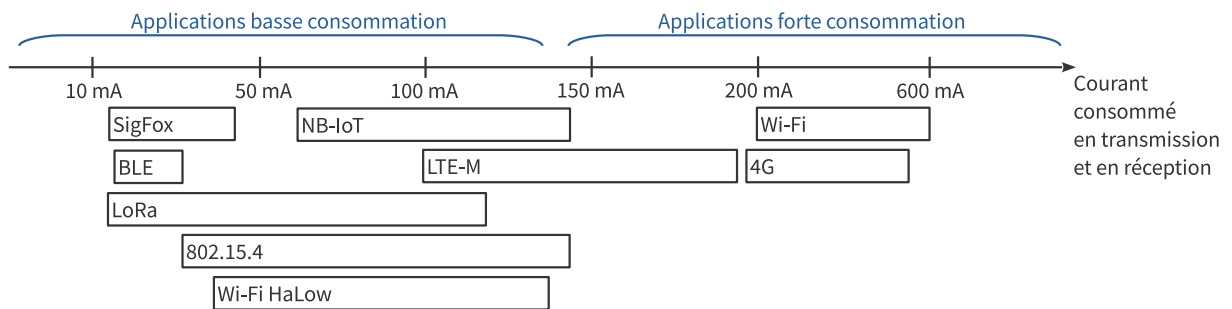


FIGURE 1.12 – Répartition des technologies IoT en fonction de l'efficacité énergétique.

et la portée dépasse rarement quelques dizaines de mètres. Dans cette catégorie, le protocole qui consomme le moins de courant en émission/réception est le BLE. Les protocoles LPWAN ont été conçus pour offrir une longue portée et une faible consommation d'énergie. Le NB-IoT et le LTE-M utilisent les infrastructures de communication cellulaire et fonctionnent dans des bandes de fréquences sous licence. Les autres solutions utilisent des bandes de fréquences libres, inférieures à 1 GHz. SigFox a la plus longue portée avec 50 km, suivi par les protocoles NB-IoT, LoRa/LoRaWAN, LTE-M et enfin le 802.11ah qui a une portée estimée à 1 km. Le débit de données varie de 100 b/s à 346 Mbit/s et la latence d'une dizaine de millisecondes à quelques secondes. Dans cette catégorie, les protocoles qui consomment le moins de courant en émission/réception

sont le LoRa et le SigFox.

La faible portée des réseaux WPAN limite leurs utilisations à quelques cas d'usage, tels que le *Smart Home* ou l'*e-health*. À l'inverse, les réseaux LPWAN proposent une couverture plus importante et une meilleure efficacité énergétique, mais avec un débit plus faible et une plus grande latence. Sur les figures, on remarque que le Wi-Fi HaLow est la seule solution économe en énergie, avec une portée estimée à 1 km. C'est également la seule solution LPWAN qui offre un débit élevé et une latence faible [97, 98]. Ses caractéristiques en font un des protocoles les plus prometteurs de l'IoT, capable de couvrir de nombreux cas d'usage.

Dans cette étude, nous avons choisi de nous intéresser aux technologies de communication fonctionnant sans licence car elles offrent aux utilisateurs la possibilité de maîtriser le coût et le fonctionnement de leurs solutions. Nous avons également décidé de porter notre étude sur des cas d'usage nécessitant une longue portée, tel que le *Smart City*, le *Smart Grid* ou l'*Industry 4.0*. Les deux premiers cas ont des besoins en couverture et le dernier en latence et en débit. À partir de ces considérations, nous avons choisi d'étudier les protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini le concept d'IoT. Nous avons présenté ses applications, ses contraintes et ses défis. Les précisions apportées concernant ces notions nous ont permis de circonscrire le sujet et nous aideront par la suite à construire et étayer nos démonstrations. Nous nous sommes également appropriés une modélisation du fonctionnement des réseaux IoT, afin de présenter et de comparer les principaux protocoles de communication. Cette comparaison nous a permis de choisir les deux protocoles qui seront étudiés dans la suite de ce document, le Wi-Fi HaLow et le LoRa/LoRaWAN.

Ces protocoles ont une stratégie différente de gestion de l'énergie. Dans les chapitres suivants, nous proposons des modélisations de leurs consommations d'énergie. Ces modèles seront comparés à des résultats de mesures réalisées sur des bancs de test.

FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE 802.11AH

Introduction

Le protocole Wi-Fi HaLow est une solution de communication sans fil qui a été spécialement conçu pour l'IoT. Il hérite des caractéristiques du Wi-Fi "classique" et intègre de nouveaux mécanismes qui permettent d'augmenter la portée des communications et d'optimiser la consommation d'énergie. Dans ce chapitre, nous décrivons le fonctionnement du protocole Wi-Fi HaLow, ses caractéristiques, ses mécanismes d'accès au media et ses méthodes de gestion de l'énergie. Nous introduisons également les bases théoriques nécessaires à l'élaboration de modèles, qui seront utilisés dans les chapitres suivants pour qualifier les performances de ce protocole.

2.1 Les protocoles Wi-Fi et Wi-Fi HaLow

Le protocole Wi-Fi HaLow est une variante du Wi-Fi "classique", qui a été développée pour répondre aux contraintes de l'IoT. Traditionnellement, le Wi-Fi fournit un débit élevé à quelques dizaines de stations sur quelques dizaines de mètres. En comparaison, le Wi-Fi HaLow doit assurer la connexion d'un grand nombre de stations, minimiser la consommation d'énergie et offrir une couverture géographique étendue. La technologie Wi-Fi s'appuie sur une suite de normes standardisées (IEEE 802.11) qui évolue par amendements. Les tableaux 2.1 et 2.2 contiennent la liste des principaux amendements proposés pour les couches PHY et MAC [99, 100].

Le 802.11ah est un amendement qui a été intégré à la version 802.11-2016 du Wi-Fi. Wi-Fi HaLow est l'appellation commerciale du 802.11ah. Ce protocole assure les fonctions des couches d'accès au média et comble le fossé entre les technologies WPAN et LPWAN. Les transmissions sont réalisées dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz, afin d'augmenter la portée de transmission et minimiser la consommation d'énergie. Ce protocole intègre de nouveaux mécanismes d'accès au média qui assurent la gestion de nombreuses stations tout en optimisant la consommation d'énergie. Les débits de données annoncés permettent d'envisager diverses applications telles que le traitement vidéo, la robotique ou la collecte de données. Officiellement, la spécification suggère trois cas d'usage [101-103] :

TABLEAU 2.1 – Les amendements du standard 802.11 pour la couche PHY.

Amendement	Débit max.	Fréquence	Année	Modulation radio
802.11	2 Mbit/s	2.4 GHz	1997	FHSS ou DSSS
802.11a	54 Mbit/s	5 GHz	1999	OFDM
802.11b	11 Mbit/s	2.4 GHz	1999	DSSS ou HR-DSSS ¹
802.11g	54 Mbit/s	2.4 et 5 GHz	2003	DSSS ou OFDM
802.11n	600 Mbit/s	2.4 et 5 GHz	2009	OFDM, SU-MIMO ²
802.11ac	7 Gb/s	5 GHz	2013	OFDM, MU-MIMO ³
802.11ah	346,7 Mbit/s	<1 GHz	2016	OFDM, MU-MIMO
802.11ax	10 Gbit/s	2.4 et 5 GHz	2019	OFDMA, MU-MIMO

¹ High Rate-DSSS, ² Single User-MIMO, ³ Multiple User-MIMO

TABLEAU 2.2 – Les amendements du standard 802.11 pour la couche MAC.

Amendement	Année	Description
802.11e	2005	Gestion de la QoS ¹ et de l'économie d'énergie
802.11h	2003	Sélection dynamique des canaux et de la puissance (DFS ² et TPC ³)
802.11i	2004	Amélioration de la sécurité des transmissions (WPA)
802.11k	2008	Gestion des ressources radio
802.11r	2008	Amélioration de la mobilité entre différents points d'accès
802.11s	2011	Gestion des réseaux maillés
802.11u	2011	Mobilité entre différents réseaux Wi-Fi et les réseaux GSM ⁴
802.11w	2009	Sécurisation des trames de gestion
802.11ae	2012	Priorisation d'accès au media pour les trames de gestion
802.11ai	2016	Mécanismes de configuration rapide des liaisons
802.11ak	2018	Association des capacités d'une liaison Wi-Fi et Ethernet
802.11aq	2018	Gestion des annonces aux clients avant leurs connections
802.11ba	2019	Mécanisme de gestion de l'énergie - <i>Wake up Radio</i> (WuR)

¹ Quality of Service,

² Dynamic Frequency Selection,

³ Transmit Power Control,

⁴ Global System for Mobile communications

1. la collecte de données issues de capteurs et de compteurs intelligents avec l'objectif de couvrir une zone étendue dans des environnements intérieurs, urbains et ruraux ;
2. la liaison de retour (*backhaul*) entre les passerelles qui recueillent les données des dispositifs IoT et les serveurs d'applications qui traitent ces données ;
3. des transmissions Wi-Fi à longue portée avec pour objectif d'étendre la couverture des réseaux Wi-Fi "classiques" ou de délester le trafic en provenance des réseaux cellulaires.

Le 802.11ah est une technologie TCP/IP native, qui intègre des mécanismes de sécurité avancés tels que le SSL/TLS (*Secure Sockets Layer/Transport Layer Security*) ou le WPA3. La couche MAC assure l'accès au media, l'association des stations au point d'accès, l'encapsulation des trames vers la couche PHY et la gestion de l'énergie. La couche PHY assure la (dé)modulation du flux de données binaires afin d'adapter la forme d'onde au canal de transmission.

2.2 Description de la couche PHY du protocole 802.11ah

La couche physique est construite autour de la modulation OFDM et les transmissions sont réalisées dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz [102, 104]. La figure 2.1 représente différentes bandes de fréquences autorisées dans différentes régions du monde. En Europe, la bande de fréquence se situe entre 863 et 868 MHz, il est possible de la diviser en canaux de 1 MHz ou 2 MHz. Aux États-Unis, la bande de fréquence se situe entre 902 et 928 MHz avec des canaux de bande passante égale à 1, 2, 4, 8 ou 16 MHz.

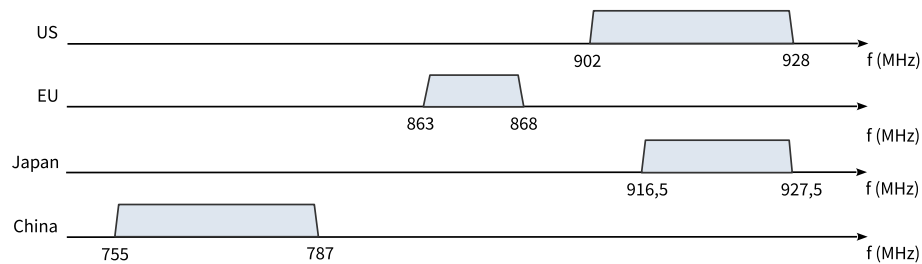


FIGURE 2.1 – Bandes de fréquences utilisées par le 802.11ah dans différentes régions du monde.

Le débit de données varie entre 150 kbit/s et 78 Mbit/s et la portée peut atteindre 1 km. La norme 802.11ah autorise l'implémentation de la technologie MIMO afin de disposer d'une diversité spatiale et augmenter le débit de données jusqu'à 346,7 Mbit/s [105, 106].

2.2.1 La modulation OFDM

Le principe de la modulation OFDM

L'OFDM est une technique de modulation où les données sont transmises en parallèle sur plusieurs sous-porteuses. Elle est adaptée aux transmissions à large bande dans des environnements soumis à des évanouissements sélectifs en fréquence. Le principe de la modulation OFDM est schématisé sur la figure 2.2 [99, 100].

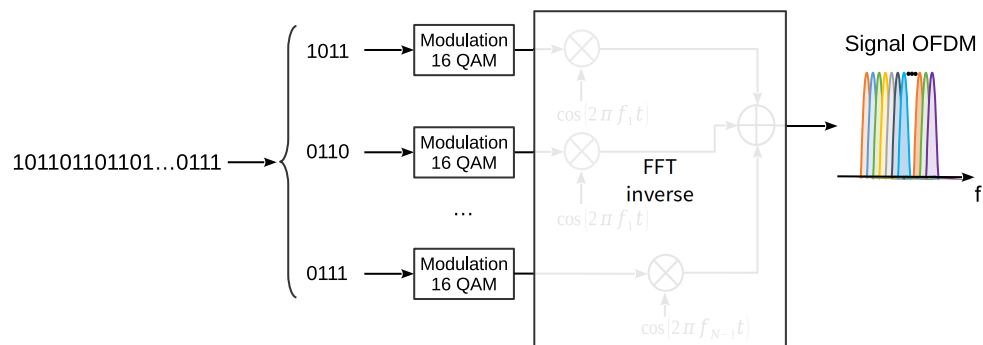


FIGURE 2.2 – Principe de la modulation OFDM

Le flux d'informations numériques est séparé et chaque groupe de bits est codé à l'aide d'une technique de modulation numérique. Les points de constellation forment un symbole OFDM qui est converti en un signal par une transformée de Fourier discrète inverse. Cette conversion est modélisée par l'équation (2.1) :

$$s_{\text{ofdm}}(t) = \frac{1}{N_{\text{sc}}} \sum_k X_k \cdot e^{j2\pi k \Delta_f t} \quad 0 \leq t < t_{\text{dft}}. \quad (2.1)$$

Le coefficient X_k représente l'information modulée sur chaque sous-porteuse, N_{sc} est le nombre de sous-porteuses, Δ_f l'écart entre chaque sous-porteuse et t_{dft} la durée d'un symbole OFDM. t_{dft} et N_{sc} représentent également la période et le nombre d'échantillons de la transformée de Fourier inverse. Pour minimiser les interférences, les sous-porteuses doivent être orthogonales les unes par rapport aux autres. Si elles sont séparées en fréquence par l'inverse de la période du symbole, le pic des lobes principaux des sous-porteuses coïncide avec le zéro des sous-porteuses adjacentes. Δ_f doit donc être égal à $\frac{1}{t_{\text{dft}}}$ [99].

Les caractéristiques de la modulation OFDM du 802.11ah

Les caractéristiques physiques du 802.11ah sont dans un rapport de 10 avec celles du 802.11ac [104, 107, 108]. La figure 2.3 et le tableau 2.3 représentent et synthétisent ces caractéristiques.

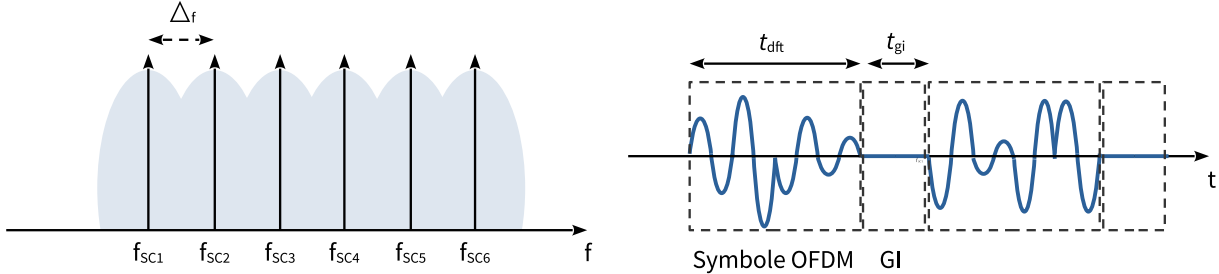


FIGURE 2.3 – Caractéristiques de la modulation OFDM pour le 802.11ah

TABLEAU 2.3 – Caractéristiques de la modulation OFDM dans les normes 802.11ah et 802.11ac.

	Mod.	Bande passante	t_{gi}	t_{dft}	Δ_f
802.11ah	OFDM	1/2/4/8/16 MHz	4/8 μs	32 μs	31,25 kHz
802.11ac	OFDM	20/40/80/160 MHz	0,4/0,8 μs	3,2 μs	312,5 kHz

Les transmissions OFDM de bande passante supérieure ou égale à 2 MHz utilisent une FFT (*Fast Fourier Transform*) de 64, 52 sous-porteuses transportent les données et 4 servent de pilotes. Les sous-porteuses pilotes sont utilisées pour l'estimation du canal et la synchronisation des horloges. Elles sont modulées mais ne contiennent pas de données utiles. Les transmissions OFDM à 1 MHz utilisent une FFT de 32, 24 sous-porteuses transportent les données et 4 sous-

porteuses servent de pilotes. L'écart entre les sous-porteuses est égale à 31,25 kHz et la durée d'un symbole est de 32 μ s. Chaque sous-porteuse transporte une constellation modulée en BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM ou 256-QAM [99, 104, 107, 108].

Le 802.11ah utilise des bandes passantes plus étroites que le 802.11ac, ce qui rend les transmissions plus sensibles à l'évanouissement peu sélectif en fréquences que l'on retrouve souvent dans les environnements intérieurs. Ce problème est surmonté en sélectionnant les sous-porteuses pour la transmission. Un équipement 802.11ah modifie les sous-porteuses pilotes à chaque symbole OFDM afin d'avoir une meilleure estimation du canal et d'y apporter les corrections nécessaires pendant la transmission. Cette solution permet d'améliorer le bilan de liaison de 7 dB [104, 107].

Intervalles de garde utilisées dans le 802.11ah

Pour atténuer les interférences inter-symboles, un intervalle de garde (*Guard Interval* ou GI) est ajouté entre chaque symbole. Ce court espace de temps protège les symboles d'une synchronisation imparfaite, due à une dérive de l'horloge ou aux retards de propagation par trajets multiples. La norme 802.11ah propose deux intervalles de garde. Avec un intervalle de garde long (8 μ s), la durée d'un symbole est de 40 μ s. Avec un intervalle de garde court (4 μ s), la durée d'un symbole est de 36 μ s. L'intervalle de garde court est optionnel, il a été proposé afin d'augmenter le débit d'environ 10%, mais il rend le signal plus sensible aux retards long [99, 104, 107, 108].

La norme 802.11ah ne fournit pas de méthodes de sélection des deux GI et laisse l'implémentation au choix des constructeurs. L'intervalle de garde court améliore le débit binaire uniquement dans les environnements peu obstrués. Une méthode souvent employée est de sélectionner l'intervalle de garde court lorsque le débit maximum a été atteint avec l'intervalle de garde long [99, 104, 107, 108].

2.2.2 Le multiplexage spatial

La norme 802.11ah supporte la technologie MIMO. Cette technique consiste à utiliser plusieurs antennes d'émission/réception (N_{tx}/N_{rx}) afin d'exploiter le multiplexage spatial et transmettre des flux de données indépendants. Le nombre de flux (N_{ss}) est limité à 4 et doit être inférieur ou égal au nombre d'antennes de transmission (N_{tx}). La technologie MIMO peut être implémentée de différentes manières et servir à augmenter le débit de données, multiplexer les transmissions ou renforcer la robustesse des communications. Le 802.11ah supporte les implémentations suivantes :

1. le multiplexage spatial permet d'augmenter le débit de données par une transmission simultanée de plusieurs fragments d'une même trame sur différentes antennes. A la réception, les canaux sont décorrélés afin de recevoir les différentes portions du message.

2. la diversité spatiale permet de renforcer la robustesse en transmettant la même trame sur différentes antennes. A la réception, les signaux sont additionnés pour obtenir un meilleur rapport signal sur bruit ou décodés de manière indépendante afin d'en extraire les informations.
3. la *beamforming* permet de diriger le faisceau radio vers une station (STA) en particulier. Un AP 802.11ah, qui possède généralement plus d'antennes qu'une station, exploite le *beamforming* pour adresser des faisceaux radio indépendants à plusieurs utilisateurs en même temps. Cette technique est appelée DL MU-MIMO.

Il est à noter les mécanismes de diversité spatiale requièrent généralement plus de puissance de calcul, de mémoire et de ressources en énergie [99, 104, 107, 108].

2.2.3 Les modèles de propagation proposés par le TGah

Le groupe de travail TGah (*Task Group of 802.11ah*) fournit deux modélisations détaillées des caractéristiques spatio-temporelles du canal de propagation. Ces modèles sont construits à partir de réponses impulsionnelles. Les modèles intérieurs sont basés sur ceux de la norme 802.11n et présentent des retards compris entre 0 et 150 ns. Les modèles extérieurs sont basés sur ceux de la 4G, fournis par le 3GPP. Ils présentent en moyenne un étalement des retards de 129 à 365 ns [99, 101, 109].

Les modèles de propagation en extérieur

En extérieur, deux modèles de propagation sont proposés : le modèle *macro* et le modèle *pico/hotzone* [109-113]. Pour les déploiements *macro*, la norme considère que l'antenne est positionnée à 15 m au-dessus du toit d'un bâtiment. L'affaiblissement est obtenu par l'équation (2.2) :

$$PL_{\text{out}}(d) = 8 + 37,6 \cdot \log_{10}(d) + 21 \cdot \log_{10}\left(\frac{f_c}{f_c^*}\right) \quad \text{avec } f_c^* = 900 \cdot 10^6 \text{ Hz}, \quad (2.2)$$

où d est la distance entre l'AP et la STA (en mètres) et f_c la fréquence porteuse du signal (en Hz). La troisième partie de l'équation correspond à un facteur de correction de la porteuse dont la fréquence est supposée être égale à 900 MHz. Pour un déploiement *pico/hotzone*, le modèle considère que l'antenne est positionnée au niveau du toit du bâtiment. L'affaiblissement est obtenu par l'équation (2.3) :

$$PL_{\text{out}}(d) = 23,3 + 36,7 \cdot \log_{10}(d) + 21 \cdot \log_{10}\left(\frac{f_c}{f_c^*}\right) \quad \text{avec } f_c^* = 900 \cdot 10^6 \text{ Hz}. \quad (2.3)$$

Les équations (2.2) et (2.3) représentent l'affaiblissement médian sur le trajet. La déviation

autour de cette médiane doit être modélisée en ajoutant une variable gaussienne aléatoire, de moyenne nulle et d'écart type égal à 8 dB pour les déploiements *macro* et 10 dB pour les déploiements *pico/hotzone*. Le TGah préconise également d'ajouter une perte de 10 dB lorsque le signal est transmis depuis l'extérieur vers l'intérieur d'un bâtiment [109-113].

Le modèle de propagation en intérieur

Les modèles de propagation en intérieur sont basés sur ceux du 802.11n [101, 109-113]. La norme propose six modèles pour six cas d'usage et chaque modèle a une réponse impulsionnelle différente. L'atténuation du modèle générique est donnée par l'équation (2.4) :

$$PL_{in}(d) = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f_c}{c} \right) & \text{pour } d \leq d_{bp}, \\ 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f_c}{c} \right) + 35 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{bp}} \right) & \text{pour } d > d_{bp}, \end{cases} \quad (2.4)$$

où f_c est la porteuse du signal (en Hz), c correspond à la célérité des ondes électromagnétiques (en m/s), d est la distance entre l'émetteur et le récepteur (en mètres) et d_{bp} est la distance du point de rupture (en mètres). d_{bp} caractérise la distance à partir de laquelle le modèle en espace libre n'est plus valable. Le tableau 2.4 présente les différentes caractéristiques de ces modèles [109-113].

TABLEAU 2.4 – Caractéristiques des modèles de propagation en intérieur du protocole 802.11ah.

Modèle	d_{bp} (en m)	Facteur d'évanouissement avant d_{bp} (en dB)	Facteur d'évanouissement après d_{bp} (en dB)	Exemple d'environnement
A	5	2	3	•
B	5	2	3	Résidence, habitation
C	5	2	4	Salle de classe, Bureau
D	10	2	4	Salle de conférence
E	20	2	5	Étage de bureau, campus
F	30	2	5	Entrepôt, usine

Ces modélisations sont valables uniquement dans des environnements avec un seul étage. Un facteur d'atténuation peut être ajouté au modèle défini par l'équation 2.4, pour modéliser la transmission à travers les étages. Cette atténuation est obtenue en utilisant l'équation (2.5) :

$$PL_e(N_e) = \sum_{q=1}^{N_e} k_q, \quad (2.5)$$

où $PL_e(N_e)$ correspond à l'atténuation due aux différents étages, q est l'indice de l'étage, N_e est le nombre d'étages à traverser et k_q représente le coefficient d'atténuation pour chaque étage traversé. Le tableau 2.5 contient la valeur de l'atténuation en fonction du nombre d'étages et

l'écart-type du facteur d'évanouissement à ajouter pour chaque étage [99, 107].

TABLEAU 2.5 – Coefficient correctif moyen et son écart type en fonction du nombre d'étages.

Nombre d'étages N_e	$\sum_{q=1}^{N_e} k_q$ (en dB)	Facteur d'évanouissement (en dB)
1	12,9	7
2	18,7	2,8
3	24,4	1,7
4	27,7	1,5

2.2.4 Structure des trames de couche PHY

La structure de la trame (PPDU)

La trame PPDU (*Physical Protocol Data Unit*) est construite par la couche physique en ajoutant un en-tête PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*) et un préambule au MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) fourni par la couche MAC. Les figures 2.4, 2.5 et 2.6 représentent les différents formats d'une trame de couche physique.

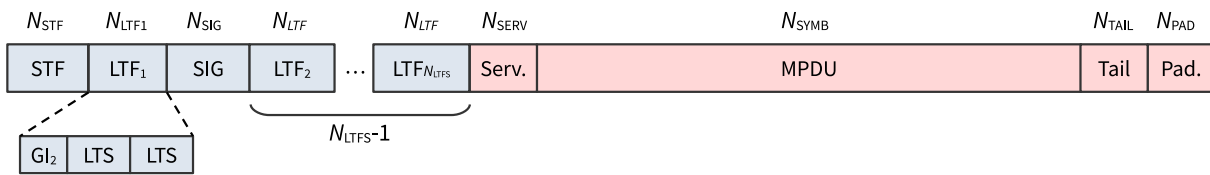


FIGURE 2.4 – Format d'une trame physique courte ($BW \geq 2$ MHz).

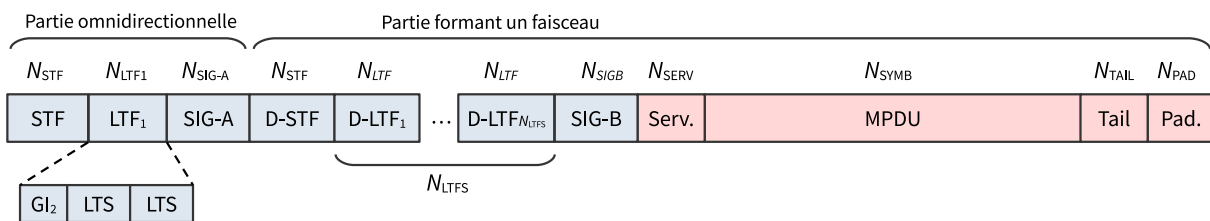


FIGURE 2.5 – Format d'une trame physique longue ($BW \geq 2$ MHz).

La norme définit trois formats ou structures de trames. Les trames courtes (S1G_SHORT) sont utilisées pour la transmission de données d'un utilisateur unique avec une bande passante supérieure ou égale à 2 MHz. Les trames longues (S1G_LONG) sont utilisées pour la transmission de données multi-utilisateurs avec formation de faisceaux et une bande passante supérieure ou égale à 2 MHz. Enfin, les trames S1G_1M sont utilisées pour la transmission de données d'un utilisateur unique avec une bande passante de 1 MHz [87, 99, 107].

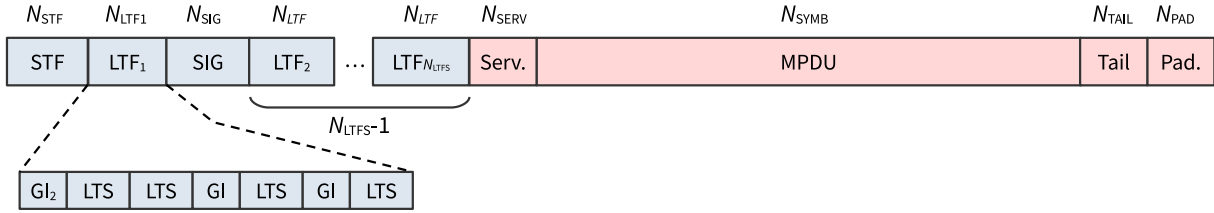


FIGURE 2.6 – Format d'une trame physique 1M (BW=1 MHz)

Les champs STF (*Short Training Field*) et LTF (*Long Training Field*) constituent le préambule qui est présent au début de chaque trame. Ces champs sont construits par une forme d'onde connue, avec des propriétés d'auto-corrélation permettant au récepteur de détecter le début d'une trame, de synchroniser les horloges, de compenser les décalages en temps et en fréquences et de régler automatiquement le gain de l'amplificateur pour chaque sous-porteuse. L'en-tête PLCP est constitué au minimum par le champ SIG (*SIGnal*) qui contient des informations nécessaires au décodage du MPDU. Le tableau 2.6 contient la longueur et la durée des différents champs pour les trois formats de trame [99, 100, 107, 108].

TABLEAU 2.6 – Nombre de symbole et durée des champs d'en-tête de la couche physique.

Format	N_{stf} (t_{stf})	N_{ltf} (t_{ltf})	N_{sig} ou N_{siga} (t_{sig} ou t_{siga})	N_{dstf} (t_{dstf})	N_{lfts} (t_{dltf})	N_{sigb} (t_{sigb})
S1G_SHORT (≥ 2 MHz)	2 symb (80 μ s)	2 symb (80 μ s)	2 symb (80 μ s)	•	1 symb / LTF (40 μ s)	•
S1G_LONG (≥ 2 MHz)	2 symb (80 μ s)	2 symb (80 μ s)	2 symb (80 μ s)	1 symb (40 μ s)	1 symb / D-LTF (40 μ s)	1 (40 μ s)
S1G_1M (= 1 MHz)	4 symb (160 μ s)	4 symb (160 μ s)	6 symb (240 μ s)	•	1 symb / LTF (40 μ s)	•

Le nombre de champs LTF ou D-LTF dépend du nombre de flux spatio-temporels générés par la station ou l'AP. La partie omnidirectionnelle de la trame longue (S1G_LONG) est modulée par un seul flux spatio-temporel et l'autre partie par plusieurs flux spatio-temporels, à destination d'un ou plusieurs utilisateurs [99, 107].

Les champs STF et LTF

La synchronisation est une fonction essentielle de la modulation OFDM, elle permet à l'émetteur et au récepteur de transmettre des trames avec une grande précision et un débit élevé. Cette synchronisation est réalisée en deux étapes à l'aide des champs STF et LTF. Le STF est utilisé pour réaliser une synchronisation grossière des horloges du récepteur et le LTF pour réaliser une synchronisation fine. La forme temporelle d'un signal OFDM pour une trame S1G_1M est représentée sur la figure 2.7. Ce signal a été généré à l'aide de la boîte à outil *WLAN Toolbox*

de Matlab. La durée des champs STF et LTF est de 160 μs et la durée du champ SIG est de 240 μs [99, 100, 107, 108].

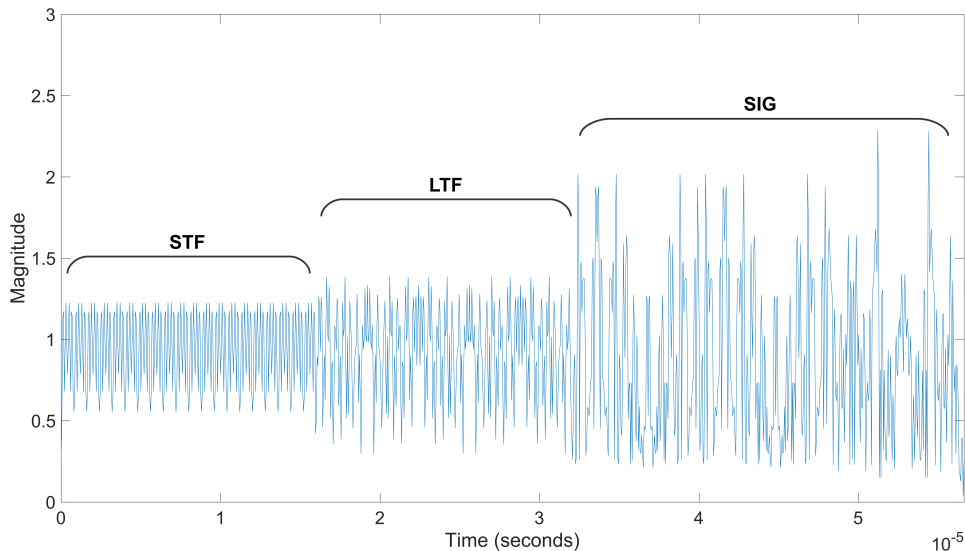


FIGURE 2.7 – Forme temporelle d'un signal OFDM pour une trame S1G_1M.

Sur la figure 2.7, la séquence du STF contient 20 répétitions d'un même symbole de 8 μs , modulés sur 6 sous-porteuses parmi les 24 disponibles. Pour une transmission de bande passante supérieure ou égale à 2 MHz, la séquence contiendrait 10 répétitions modulées sur 12 sous-porteuses parmi les 52 disponibles. La détection du début de la trame et l'ajustement du gain de l'amplificateur est réalisé par l'auto-corrélation d'un symbole avec le précédent. La nature répétitive de la séquence permet au récepteur d'ajuster son horloge et d'estimer le décalage en fréquence par la mesure du déphasage entre deux symboles consécutifs. La précision temporelle est de quelques centaines de μs et la correction en fréquence est à $\pm 62,5$ kHz.

Le LTF est constitué par des séquences d'apprentissage connues et transmises sur toutes les sous-porteuses du signal OFDM. Sa structure est représentée sur les figures 2.4, 2.5 et 2.6 et dépend du format de la trame physique. Pour une bande passante supérieure ou égale à 2 MHz, le LTF contient un intervalle de garde de 16 μs suivi de deux séquences d'apprentissage de 32 μs . Pour une bande passante à 1 MHz, deux intervalles de garde de 8 μs et deux séquences d'apprentissage ont été ajoutées en supplément. La différence de phase entre les symboles de données reçus et ceux attendus est utilisée pour ajuster l'horloge avec une précision de quelques nanosecondes. Une FFT est également réalisée sur les séquences d'apprentissage, afin d'estimer la qualité du canal en retirant du signal d'information le symbole d'apprentissage connu. La différence de phase entre deux symboles séparés par une durée de 32 μs permet de réaliser une correction fine de la fréquence, à $\pm 15,625$ kHz [99, 107].

Les champs SIG, SIG-A et SIG-B

Le champ SIG contient les informations nécessaires à l'interprétation et au décodage des trames MPDU, telles que le MCS (*Modulation and Coding Scheme*), la bande passante, le nombre de flux spatio-temporels, le type de GI, la longueur de la trame et un code correcteur d'erreurs. Sa structure dépend du format de la trame. Pour une trame courte (SIG_SHORT), les informations sont réparties sur 48 bits ou deux symboles. Pour une trame SIG_1M, elles sont réparties sur 36 bits ou six symboles. Les symboles du champ SIG sont modulés en BPSK avec un taux de codage de 1/2 [99, 107, 108].

Les champs SIG-A et SIG-B sont présents uniquement dans les trames longues (SIG_LONG). Le champ SIG-A remplace le champ SIG et son contenu dépend du nombre d'utilisateurs. Le premier bit du premier symbole permet au récepteur de déterminer s'il s'agit d'une trame à destination d'un utilisateur unique. Les autres informations sont identiques à celles du champ SIG, mais elles sont détaillées pour chaque flux. Le champ SIG-B est uniquement utilisé dans les transmissions multi-utilisateurs et contient notamment le MCS des différents flux spatio-temporels [99, 107, 108].

Le champ de données PSDU ou MPDU

La couche physique ajoute au MPDU fourni par la couche MAC les champs *service*, *tail* et *pad*. Le champ *service* contient 8 bits à 0 qui permettent de synchroniser le désembrouilleur à la réception. Le champ *tail* contient 6 bits à 0, qui seront ensuite modifiés par l'embrouilleur pour améliorer la probabilité de détection des erreurs. Les opérations d'embrouillage (*scrambling*) et d'encodage sont décrites dans la partie 2.2.5. Le champ *pad* contient des bits de remplissage qui permettent au champ de données d'avoir une longueur multiple du nombre de bits codés dans un symbole OFDM. Le PSDU (*Physical Service Data Unit*) est modulé en un flux de symboles OFDM dont le nombre dépend de la taille de la trame MAC. Ces symboles sont transmis sur 24 ou 52 sous-porteuses, en fonction de la bande passante. Quatre sous-porteuses pilotes y sont ajoutées afin de maintenir la synchronisation en temps et en fréquence, durant la transmission [99, 107, 108].

2.2.5 Structure d'un émetteur/récepteur 802.11ah

Un équipement Wi-Fi est constitué d'un émetteur et d'un récepteur. Le circuit émetteur récupère le MPDU de la couche MAC, module les données en signal OFDM, y ajoute le préambule et l'en-tête PLCP avant de transmettre le tout à travers une ou plusieurs antennes. Le récepteur effectue les opérations inverses ; il démodule le signal OFDM et en extrait le PSDU qu'il transmet à la couche MAC. La norme 802.11ah donne une description détaillée de la structure de l'émetteur et seulement quelques directives pour le récepteur.

Structure d'un émetteur 802.11ah

Le processus de création d'une trame PHY commence par la génération des champs STF et LTF. Le champ SIG est construit en parallèle, à partir de la longueur de la trame et du MCS. Le champ de données est codé séparément en suivant le diagramme de fonctionnement présenté à la figure 2.8 [99, 100, 107, 108].

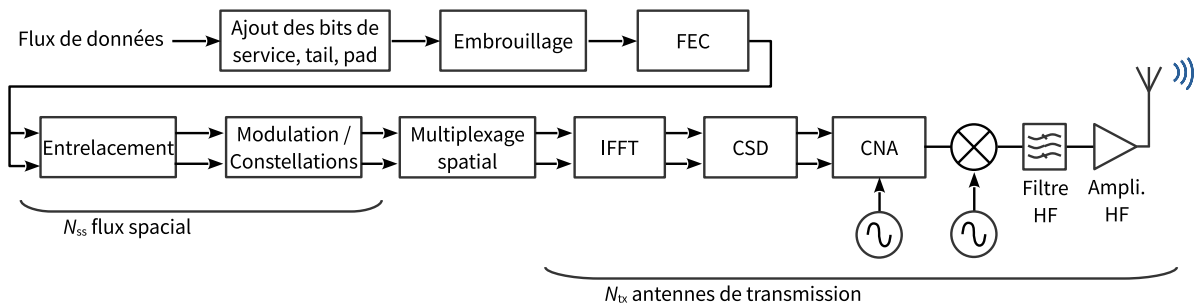


FIGURE 2.8 – Diagramme de fonctionnement d'un émetteur 802.11ah.

La première opération consiste à ajouter les champs *service*, *tail* et *pad*. L'ensemble est ensuite embrouillé afin de transformer les informations en un signal numérique pseudo-aléatoire et ainsi améliorer sa robustesse lors de la transmission. L'embrouilleur utilise un générateur de séquences de 127 bits qui brouille tous les bits du champ de données afin d'éviter les longs flux de 1 et de 0. Ces derniers pourraient créer une tension de polarisation continue au niveau du récepteur et entraîner des erreurs de réception. Le polynôme générateur est d'ordre 7 et d'équation : $S(x) = x^7 + x^4 + 1$. Les données embrouillées sont ensuite codées avec un codeur binaire convolutif à taux de codage 1/2, 2/3, 3/4 ou 5/6. Les techniques de codage d'erreur utilisées par la norme 802.11ah sont décrites plus loin dans le texte.

Les données codées sont séparées en fonction du nombre de bits par symbole et chaque groupe est entrelacé par deux permutations. La première positionne les groupes de bits adjacents dans des sous-porteuses non adjacentes, de manière à limiter l'impact d'un évanouissement sur une suite de bits. La seconde répartit les bits de poids faibles et les bits de poids forts de manière à les équilibrer dans la constellation. Si le nombre de flux spatio-temporels est supérieur à 1, une troisième permutation est opérée. Elle effectue une rotation de fréquence sur les flux spatio-temporels [99, 100, 107, 108].

Après l'entrelacement, les groupes de bits sont modulés (en BPSK, QPSK ou QAM) et réparties sur les différentes sous-porteuses. Les pilotes sont insérés et chaque symbole est transposé dans le domaine temporel par l'IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) pour former le signal OFDM. Les symboles sont ensuite mis en forme par l'insertion des intervalles de garde, le lissage des transitions et l'ajout d'une temporisation. Les signaux sont convertis en un signal à temps continu puis transmis à l'étage haute fréquence pour émission [99, 100, 107, 108].

Structure d'un récepteur 802.11ah

Le processus de réception d'une trame de couche physique commence par la détection du signal. Un récepteur doit attendre qu'un signal dépasse un seuil de détection avant de lancer le processus de décodage. Avec une bande passante de 1 MHz, une trame est détectée si son niveau de puissance est supérieur ou égal à -98 dBm pendant une période de 40 μ s, ou -89 dBm pendant une période de 212 μ s. Les données sont ensuite décodées en suivant le diagramme de fonctionnement présenté à la figure 2.9 [99, 107, 108].

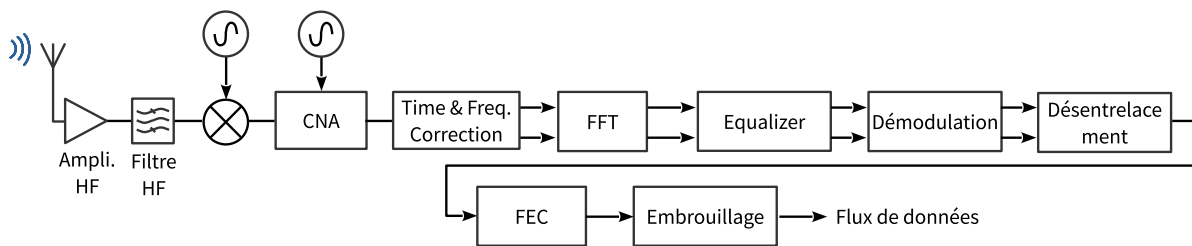


FIGURE 2.9 – Diagramme de fonctionnement d'un récepteur 802.11ah.

Les champs STF et LTF sont utilisés pour calibrer les horloges en temps et en fréquence et le champ SIG permet de configurer les paramètres de réception. Pour chaque symbole de données reçu, les intervalles de garde sont retirés et la FFT est appliquée afin de transposer le signal en fréquence. Le champ LTF et les pilotes servent à égaliser les sous-porteuses en amplitude, corriger le déphasage, les décalages en fréquences et synchroniser les symboles. Chaque symbole est ensuite démodulé et désentre-lacé, puis un décodage est effectué sur le flux de données et les bits sont désembrouillés pour reformer la trame de couche MAC [99, 107, 108].

Les codes correcteurs d'erreurs

Un équipement 802.11ah insère un code correcteur d'erreur au flux de données avant la modulation OFDM. Cette opération est notée FEC (*Forward Error Correction*) sur les figures 2.8 et 2.9. Le codage est utilisé pour détecter et corriger les erreurs à la réception. La norme 802.11ah propose deux méthodes : BCC qui est obligatoire et LDPC qui est optionnelle.

Un codeur binaire convolutif (*Binary Convolutional Coding* ou BCC) génère des bits de parité par l'application glissante d'une fonction polynomiale à un flux de données. Le processus d'encodage est réalisé de manière continue en utilisant uniquement des registres à décalage et des portes XOR (*eXclusive OR*). La méthode BCC du 802.11ah utilise un registre à décalage sur 7 bits, des polynômes générateurs $G_A = 133_8$ et $G_B = 171_8$, et un taux de codage de 1/2. Les autres taux de codage (2/3, 3/4 et 5/6) sont obtenus par perforation de symboles, c'est à dire que des bits de parité sont calculés mais non transmis [99, 107].

L'autre technique, appelée LDPC (*Low Density Parity Check*), fournit de meilleures perfor-

mances mais elle reste optionnelle pour des raisons de complexité. Elle est basée sur la formation de mots codés et doit son nom au fait que la plupart des éléments de la matrice de contrôle de parité contiennent des zéros. Les mots LDPC du 802.11ah ont une taille de 648, 1296 ou 1944 bits. Avec une taille de 1944 bits et un taux de codage de 2/3, on obtient 1296 bits de données et 648 bits de parité. Un code LDPC est construit à partir d'un seuil de bruit qu'il est possible de fixer à un niveau très proche de la limite de *Shannon*, ce qui explique les meilleures performances [99, 107].

2.2.6 Modélisation mathématique de la trame de couche physique

La trame de couche physique peut être caractérisée et modélisée d'un point de vue mathématique, en tenant compte des caractéristiques du processus d'encodage. Un équipement 802.11ah adapte en continu ses paramètres de transmission à la qualité du canal de communication. Pour cela, il mesure le niveau de puissance reçu, le rapport signal sur bruit et le PER (*Packet Error Rate*). Ces mesures sont indexées sur une combinaison de paramètres, sélectionnés parmi dix MCS, deux intervalles de garde, cinq bandes passantes et un maximum de quatre flux spatio-temporels. La norme ne définit pas de règle de sélection précise des paramètres de transmission. L'implémentation est laissée au libre choix des constructeurs [99, 100, 107].

Le débit physique et les caractéristiques de transmission

Les tableaux 2.7 et 2.8 contiennent les caractéristiques des différents MCS pour les bandes passantes de 1 et 2 MHz. Les autres combinaisons sont disponibles dans les spécifications de la norme. Le MCS est caractérisé par une technique de modulation et un taux de codage de l'encodeur (BCC ou LDPC). L'implémentation des MCS 0 à 7 est obligatoire pour toutes les bandes passantes et le MCS 10 uniquement pour la bande passante à 1 MHz. Les caractéristiques du MCS 10 sont identiques à celles du MCS 0. Les symboles y sont répétés deux fois afin d'améliorer la robustesse et accroître la portée de transmission [99, 100, 107].

Le débit de couche physique est obtenu en utilisant les équations (2.6), (2.7) et (2.8) :

$$N_{\text{cbps}} = N_{\text{sd}} \cdot N_{\text{ss}} \cdot N_{\text{bpssc}}, \quad (2.6)$$

$$N_{\text{dbps}} = N_{\text{cbps}} \cdot R, \quad (2.7)$$

$$DR_1 = \begin{cases} \frac{N_{\text{dbps}}}{t_{\text{sym}}} & \text{pour un GI long,} \\ \frac{N_{\text{dbps}}}{t_{\text{syms}}} & \text{pour un GI court,} \end{cases} \quad (2.8)$$

où DR_1 , N_{cbps} et N_{dbps} correspondent respectivement au débit de couche physique, au nombre

TABLEAU 2.7 – Schéma de modulation et de codage pour une bande passante de 1 MHz [107].

MCS	Mod.	R	N_{bpssc}	N_{cbps}	N_{dbps}	DR_1 (Mbit/s)*		Sensibilité* (dBm)
						$t_{\text{gi}}=8 \mu\text{s}$	$t_{\text{gi}}=4 \mu\text{s}$	
10	BPSK	1/4	1	24	6	0,150	0,167	-98
0	BPSK	1/2	1	24	12	0,300	0,333	-95
1	QPSK	1/2	2	48	24	0,600	0,667	-92
2	QPSK	3/4	2	48	36	0,900	1,000	-90
3	16-QAM	1/2	4	96	48	1,200	1,333	-87
4	16-QAM	3/4	4	96	72	1,800	2,000	-83
5	64-QAM	2/3	6	144	96	2,400	2,667	-79
6	64-QAM	3/4	6	144	108	2,700	3,000	-78
7	64-QAM	5/6	6	144	120	3,000	3,333	-77

* $N_{\text{ss}} = 1$ et $N_{\text{sd}} = 24$

TABLEAU 2.8 – Schéma de modulation et de codage pour une bande passante de 2 MHz [107].

MCS	Mod.	R	N_{bpssc}	N_{cbps}	N_{dbps}	DR_1 (Mbit/s)*		Sensibilité* (dBm)
						$t_{\text{gi}}=8 \mu\text{s}$	$t_{\text{gi}}=4 \mu\text{s}$	
0	BPSK	1/2	1	52	26	0,650	0,722	-92
1	QPSK	1/2	2	104	52	1,300	1,444	-89
2	QPSK	3/4	2	104	78	1,950	2,166	-87
3	16-QAM	1/2	4	208	104	2,600	2,888	-84
4	16-QAM	3/4	4	208	156	3,900	4,333	-80
5	64-QAM	2/3	6	312	208	5,200	5,777	-76
6	64-QAM	3/4	6	312	234	5,850	6,500	-75
7	64-QAM	5/6	6	312	260	6,500	7,222	-74

* $N_{\text{ss}} = 1$ et $N_{\text{sd}} = 52$

de bits codés par symbole et au nombre de bits de données codés par symbole. N_{sd} est le nombre de sous-porteuses, N_{ss} le nombre de flux spatiaux, N_{bpssc} le nombre de bits codés par symbole et par sous-porteuses et R le taux de codage de l'encodeur. N_{cbps} prend en compte les bits de données et ceux ajoutés lors de l'encodage et N_{dbps} prend en compte uniquement des bits de données. t_{syms} et t_{sym} correspondent respectivement à la durée d'un symbole OFDM avec un intervalle de garde court et un intervalle de garde long. $t_{\text{sym}}=40 \mu\text{s}$ et $t_{\text{syms}}=36 \mu\text{s}$.

Nombre de symboles et durée d'une trame de couche PHY

Le nombre de symboles OFDM contenus dans le champ de données de la trame de couche physique est obtenu avec l'équation (2.9) [99, 101, 107] :

$$N_{\text{sym}} = m_{\text{stbc}} \cdot \left\lceil \frac{8 \cdot \text{MPDU} + N_{\text{serv}} + N_{\text{tail}} \cdot N_{\text{es}}}{m_{\text{stbc}} \cdot N_{\text{dbps}}} \right\rceil. \quad (2.9)$$

où N_{sym} , N_{serv} , N_{tail} , MPDU et N_{dbps} correspondent respectivement au nombre de symbole du

champ de données, au nombre de bits contenus dans les champs *service* et *tail*, au nombre d'octets contenus dans la trame de couche MAC et au nombre de bits de données transportés par symbole. N_{serv} est égale à 8 bits, N_{tail} est égale 6 bits et la valeur N_{dbps} se trouve dans les tableaux 2.7 et 2.8. N_{es} représente le nombre de codeur BCC utilisé, et dépend du nombre de flux spatio-temporels. m_{stbc} est un coefficient à appliquer si la diversité spatiale est utilisée pour améliorer la robustesse.

Le temps de transmission d'une trame de couche PHY est obtenue par l'équation (2.10) :

$$t_{\text{tr}} = \begin{cases} t_{\text{stf}} + t_{\text{lft}} + t_{\text{sig}} + (N_{\text{lftfs}} - 1) \cdot t_{\text{lft}} + t_{\text{data}} & \text{pour une trame courte ou 1M,} \\ t_{\text{stf}} + t_{\text{lft}} + t_{\text{sig}} + N_{\text{lftfs}} \cdot t_{\text{dlft}} + t_{\text{sigb}} + t_{\text{data}} & \text{pour une trame longue,} \end{cases} \quad (2.10)$$

où t_{tr} , t_{stf} , t_{lft} , t_{dlft} , t_{sig} , t_{sigb} , t_{data} et N_{lftfs} correspondent respectivement à la durée de transmission d'une trame, la durée de transmission des champs STF, LTF et SIG, la durée de transmission du champ de données et le nombre de champ LTF ou D-LTF [99, 101, 107]. La valeur N_{lftfs} dépend du nombre de flux spatio-temporel (N_{ss}), obtenue par l'équation (2.11) :

$$N_{\text{lftfs}} = \begin{cases} N_{\text{ss}} & \text{pour 1,2 ou 4 flux spatio-temporels,} \\ N_{\text{ss}} + 1 & \text{pour 3 flux spatio-temporels,} \end{cases} \quad (2.11)$$

La durée du champ de données est obtenue par l'équation (2.12) :

$$t_{\text{data}} = \begin{cases} t_{\text{sym}} \cdot N_{\text{sym}} & \text{pour un GI long,} \\ t_{\text{sym}} \cdot \left\lceil \frac{t_{\text{syms}} \cdot N_{\text{sym}}}{t_{\text{sym}}} \right\rceil & \text{pour un GI court,} \end{cases} \quad (2.12)$$

Ces différentes équations seront utilisées dans les chapitres suivants pour modéliser les performances et la consommation énergétique d'un équipement IoT dans un réseau 802.11ah.

2.3 Description de la couche MAC du protocole 802.11ah

La couche MAC assure les fonctions d'encapsulation et d'adressage, le contrôle d'accès au média, l'association et l'authentification des STA auprès du réseau. La couche MAC du 802.11ah hérite de la majorité des caractéristiques et des mécanismes du 802.11. Des modifications ont été apportées afin d'optimiser les communications M2M, prendre en charge un nombre conséquent de STA et améliorer le bilan énergétique des communications. Pour y parvenir, quatre mécanismes ont été créés ou améliorés à partir du 802.11 : l'AID, le TIM, le RAW et le TWT.

2.3.1 Architecture d'un réseau Wi-Fi HaLow

Un réseau 802.11ah est constitué de plusieurs stations connectées en étoile autour d'un point d'accès qui gère le réseau et les services associés. L'AP est l'élément central, il est directement connecté à Internet ou aux serveurs d'applications et peut intégrer les fonctionnalités d'un routeur. Cette architecture est la brique de base (*Basic Service Set* ou BSS), appelée plus communément *infrastructure*.

Il existe trois autres types d'architecture : l'IBSS (*Independent BSS*), l'ESS (*Extended Service Set*) et le MBSS (*Mesh BSS*). L'IBSS correspond au mode *Ad Hoc* où les STA communiquent directement entre elles, sans passer par un AP. L'ESS est l'interconnexion de plusieurs BSS. Les AP sont alors reliés entre eux par une liaison de service filaire (*Distribution Service* ou DS) ou sans fil (*Wireless Distribution Service* ou WDS). Enfin, le MBSS est l'interconnexion de plusieurs AP pour former un réseau maillé. Ce type de réseau est plus robuste car il offre plusieurs routes au trafic de données. Il est également plus complexe à mettre en œuvre, notamment parce qu'il nécessite l'implémentation des fonctionnalités de routage. L'architecture BSS est la plus communément utilisée dans les réseaux domestiques et les réseaux d'entreprise.

2.3.2 Types de stations

Trois types de stations coexistent dans un réseau 802.11ah [86, 101, 114, 115] :

- les stations TIM se réveillent pour recevoir toutes les trames balise. Elles transmettent généralement leurs données dans une fenêtre temporelle, appelée RAW, qui a été réservée à leur usage par l'AP. Ces mécanismes visent à minimiser les collisions et à optimiser la consommation d'énergie. Les stations TIM ont un trafic élevé de données.
- les stations non-TIM ne sont pas soumises à la réception des trames balise. Elles transmettent généralement leurs données dans des créneaux temporels (TWT) qu'elles négocient directement avec l'AP. Ces stations disposent de peu d'énergie et doivent être le plus possible dans un état de sommeil.
- les *Unscheduled STA* peuvent émettre quand elles le souhaitent et demander un accès immédiat à l'AP. Ces stations sont non programmées et ont un besoin sporadique d'accès au support.

2.3.3 La méthode d'accès au media DCF

Le mécanisme d'accès au media CSMA/CA

La principale méthode d'accès au support du 802.11ah est une méthode décentralisée à accès multiple, appelée DCF (*Distributed Coordination Function*). Cette méthode repose sur le mécanisme CSMA/CA. Contrairement au protocole *Ethernet*, un équipement Wi-Fi fonctionne en *half-duplex*. L'isolation entre les circuits d'émission et de réception est insuffisante (≤ 40 dB) pour

lui permettre d'émettre et de recevoir en même temps. Il ne peut donc pas détecter les collisions et doit écouter le canal avant de transmettre. Si celui-ci est occupé, il diffère sa transmission. S'il est libre, il peut accéder au média et transmettre ses données [100]. Le fonctionnement du mécanisme DCF est représenté sur la figure 2.10.

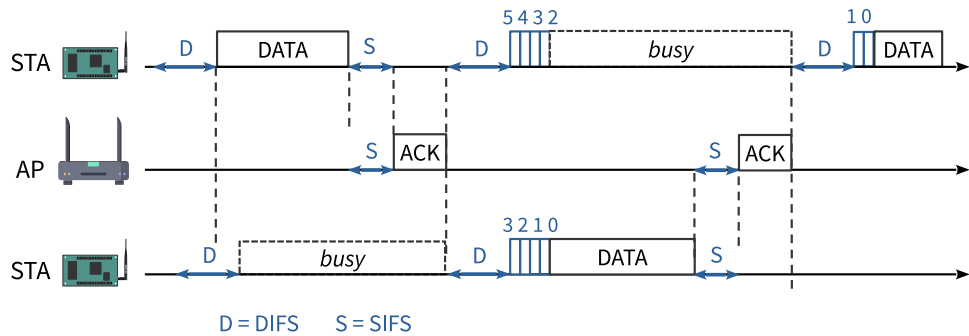


FIGURE 2.10 – Principe de fonctionnement du mécanisme DCF.

Une station qui souhaite accéder au média allume son interface radio et commence par une écoute active du canal. Si le canal est libre pendant un temps DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*), la station a acquis le média et peut transmettre ses données. Si le canal est occupé, la station diffère sa transmission jusqu'à ce que le canal soit de nouveau libre. Pour toute nouvelle tentative, le canal doit être libre pendant un temps DIFS auquel il faut ajouter une période aléatoire, appelée fenêtre de contention (*Backoff*). Cette fenêtre d'une durée pseudo-aléatoire est utilisée en prévention des collisions. Lorsque la station a acquis le média, elle en garde le contrôle en intercalant des temps d'attente très court (*Short Inter-Frame Space* ou SIFS) entre les trames. Le récepteur accuse la réception des données transmises, à l'aide d'une trame ACK [99, 116, 117].

La figure 2.11 représente une séquence de transmission avec collision. La station A se réveille, écoute le média et transmet ses données. La station B se comporte de la même manière mais avec une durée d'écoute plus courte, entraînant une collision sur le canal. Les deux stations ne recevront pas d'ACK mais doivent attendre un temps EIFS (*Extended Inter-Frame Space*) avant de retenter une transmission. L'ACK est le gage d'une transmission sans collision et sans erreur [99, 100].

Écoute active du canal

Lorsqu'une STA est réveillée et qu'elle ne transmet pas, elle est en écoute active et recherche continuellement la présence d'un préambule. Deux méthodes permettent de déterminer si le canal est libre ou occupé. Le mécanisme CCA-SD (*Clear Channel Assessment - Signal Detection*) détecte les autres transmissions Wi-Fi par la réception d'une suite de symboles STF. La station considère qu'un préambule est détecté si une suite de symboles STF est décodée avec un niveau

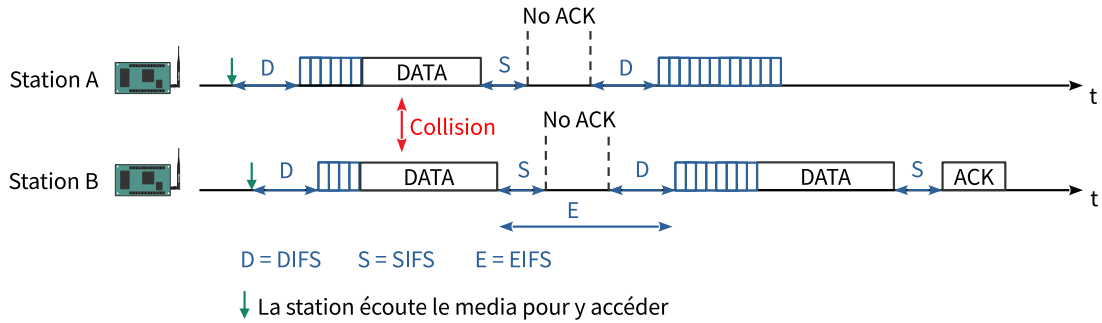


FIGURE 2.11 – Principe de fonctionnement du mécanisme DCF lors d’une collision.

supérieur ou égal à -98 dBm pendant $40 \mu\text{s}$ ou un niveau supérieur ou égal à -89 dBm pendant $212 \mu\text{s}$. Le mécanisme CCA-ED (*Clear Channel Assessment - Energy Detection*) détecte les autres sources d’interférences par la mesure du niveau d’énergie. La station considère que le media est occupé si les interférences ont un niveau supérieur ou égal à -72 dBm. Ces deux mécanismes fonctionnent en parallèle. Si la station détecte un préambule et que la trame lui est destinée, elle la décode et passe dans un état de transmission pour envoyer un ACK. Si la trame est destinée à une autre STA, elle attend la fin de la séquence avant d’accéder au média [99, 100].

Stations exposées et stations cachées

Le CCA (*Clear Channel Assessment*) est responsable de la détection des transmissions provenant d’autres stations, mais il est insuffisant si la station est hors de portée. Une station est dite exposée si elle se trouve dans la zone de couverture définie par le modèle de propagation (2.2.3) et elle est considérée comme cachée si elle se trouve en dehors de cette zone de couverture. Les fonctionnalités du CCA permettent de détecter les signaux en provenance des stations exposées mais pas des stations cachées. Afin de minimiser les risques de collision avec les stations cachées, un équipement peut initier la communication par une réservation du média [86, 99, 100]. Ce type d’échange est illustré sur la figure 2.12.

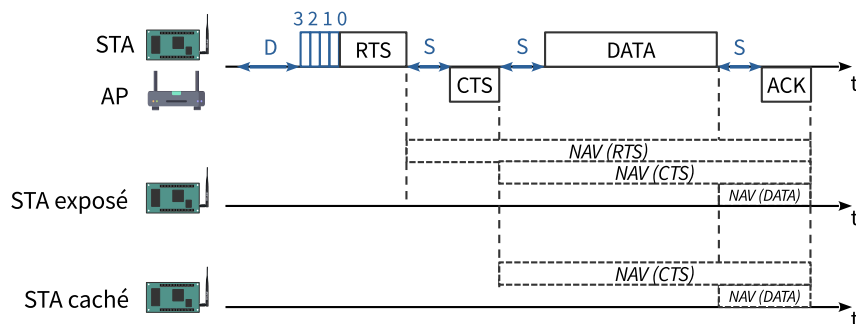


FIGURE 2.12 – Principe de fonctionnement des mécanismes RTS/CTS et NAV.

Dans cet échange, l’initiateur envoie une trame RTS (*Request To Send*) afin de réserver le média. Le destinataire répond par une trame CTS (*Clear To Send*) puis les données sont transmises, suivies de l’ACK. Une trame RTS est plus petite qu’une trame de données, elle est donc moins soumise à un risque de collision. Le mécanisme RTS/CTS protège les échanges dans un environnement avec un trafic de données élevé [86]. Il est utilisé lorsque la taille de la trame de données dépasse un certain seuil, qui est défini par l’AP en fonction de la situation du réseau.

Le NAV (*Network Allocation Vector*) est une méthode virtuelle de réservation du média utilisée en appui du CCA. Chaque trame d’une séquence contient la durée estimée de l’échange en cours. Les autres stations utilisent cette information pour activer leur mécanisme NAV et différer les tentatives d’accès en fonction du temps estimé d’occupation du média. Une STA exposée configure son NAV à la réception du RTS puis elle ajuste cette valeur à la réception des autres trames. Une STA cachée configure son NAV à la réception du CTS puis elle ajuste la valeur à la réception des autres trames. Le média est considéré comme libre si les fonctions CCA et NAV indiquent que le canal est libre. Le média est considéré comme occupé si un des deux mécanismes indique que le canal est occupé.

Temps d’attente de la couche MAC 802.11ah

Le temps SIFS sépare les trames d’une même séquence. Sa valeur est conditionnée à la latence et au temps de traitement des couches PHY et MAC. Le temps DIFS correspond au délai durant lequel le canal doit être libre avant qu’une station ne puisse émettre. En cas de retransmission, ce temps est allongé par une période de contention. Cette fenêtre est construite par le décomptage d’un nombre de créneaux temporels. Les stations initialisent le compteur en sélectionnant un entier pseudo-aléatoire d’une distribution uniforme dans l’intervalle $[0, CW]$. La valeur CW (*Collision Window*) est initialisée à une valeur minimum CW_{\min} lors de la première tentative et elle double à chaque nouvelle tentative jusqu’à atteindre la valeur maximale CW_{\max} . Enfin, le temps EIFS correspond au délai d’attente d’une station si elle ne reçoit pas un ACK. Le tableau 2.9 contient la valeur des différents temps d’attente utilisés par la méthode DCF pour la norme 802.11ah.

TABLEAU 2.9 – Temps d’accès au média 802.11ah.

	SIFS (t_{sifs})	SlotTime (t_{slot})	DIFS (t_{difs})	EIFS (t_{eifs})	CW_{\min}	CW_{\max}
= 1 MHz	160 μs	52 μs	264 μs	$\leq 1,824$ ms	15	1023
≥ 2 MHz				$\leq 0,864$ ms		

La valeur des différents temps d’attente est obtenue par les équations (2.13), (2.14) et (2.15) :

$$t_{\text{difs}} = t_{\text{sifs}} + 2 \cdot t_{\text{slot}}, \quad (2.13)$$

$$t_{cw} = m_{cw} \cdot t_{slot}, \quad (2.14)$$

$$t_{eifs} = t_{sifs} + t_{ack} + t_{difs}, \quad (2.15)$$

où t_{difs} , t_{sifs} , t_{eifs} et t_{ack} correspondent respectivement aux temps d'attente DIFS, SIFS, EIFS et à la durée de transmission d'un ACK. t_{cw} est la durée de la fenêtre de contention, m_{cw} la valeur pseudo-aléatoire sélectionnée dans l'intervalle $[0, CW]$ et t_{slot} la durée d'un créneau de la fenêtre de contention [101, 103, 107].

2.3.4 Méthode d'accès au media EDCA

L'EDCA (*Enhanced Distributed Coordination Access*) est une évolution du DCF qui priorise l'accès au média pour certaines applications afin de leur garantir une qualité de service. La norme 802.11ah définit huit catégories de QoS : quatre pour les STA de type capteurs et quatre pour les autres types de STA. Chaque catégorie est caractérisée par des valeurs spécifiques de temps d'attente. Les catégories considérées comme prioritaires sont avantagées statistiquement par des temps d'attente plus courts. Les tableaux 2.10 et 2.11 contiennent les valeurs de ces caractéristiques pour les deux types de stations [107, 117].

TABLEAU 2.10 – Paramètres du mécanisme d'accès EDCA si la STA est un capteur.

[AC]	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN	TxOP
Background (AC_BK)	15	1023	7	0
Best Effort (AC_BE)	3	15	2	0
Video (AC_VI)	7	15	5	0
Voice (AC_VO)	7	15	4	0

TABLEAU 2.11 – Paramètres du mécanisme d'accès EDCA si la STA n'est pas un capteur.

[AC]	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN	TxOP
Background (AC_BK)	15	1023	7	3,264 ms
Best Effort (AC_BE)	15	1023	3	3,264 ms
Video (AC_VI)	7	15	2	6,016 ms
Voice (AC_VO)	3	7	2	3,264 ms

Les temps AIFS (*Arbitration Inter-Frame Space*) correspondent aux temps DIFS et sont obtenus avec l'équation (2.16) :

$$t_{aifs}[AC] = AIFSN[AC] \cdot t_{slot} + t_{sifs}, \quad (2.16)$$

où $t_{\text{aifs}}[\text{AC}]$, $\text{AIFSN}[\text{AC}]$, t_{slot} et t_{sifs} correspondent respectivement au temps d'attente AIFS, à un coefficient, à la durée d'un créneau de contention et au temps d'attente SIFS.

Les trames de données sont triées par la station et positionnées dans une des quatre files d'attente. La station sélectionne statistiquement ces trames et transmet plus souvent celles de catégorie prioritaire à la couche physique. L'accès au média de l'EDCA est très similaire à celui du DCF. La station écoute le support pendant un temps d'attente AIFS avant de pouvoir transmettre. Ce temps est allongé par une fenêtre de contention en cas de collision. La figure 2.13 représente l'accès au média pour des stations utilisant le DCF ou l'EDCA. Dans le cas du DCF, le compteur de contention est décrémenté à la fin du créneau alors qu'avec l'EDCA, le compteur est décrémenté au début du créneau [107, 117].

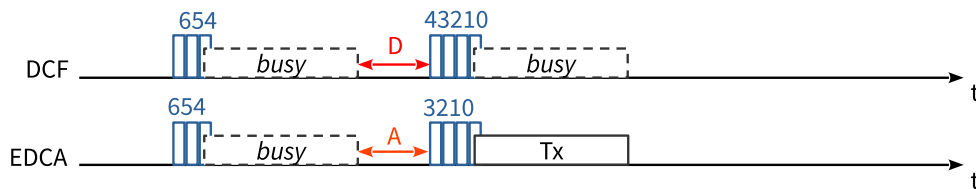


FIGURE 2.13 – Principe de fonctionnement du mécanisme d'accès au média EDCA.

La norme 802.11e autorise une station à demander l'accès au média pour une durée donnée. Cette session TxOP (*Transmission OPportunity*) est protégée des collisions à l'aide du mécanisme NAV et sa durée dépend de la catégorie QoS. La valeur maximale de la durée des sessions TxOP est définie dans les tableaux 2.10 et 2.11 pour chaque type de STA. L'EDCA est le mécanisme d'accès au média préconisé par la norme 802.11ah [107, 117].

2.3.5 Mécanismes d'association/authentification

Avant de pouvoir échanger des trames de données, une STA 802.11ah doit se connecter à un réseau. Cette opération est réalisée en trois étapes : la découverte du réseau, l'authentification et l'association. La découverte est à l'initiative des stations. De manière passive, une station reçoit des trames balise, diffusées à intervalle de temps réguliers par l'AP. Ces trames contiennent tous les paramètres de fonctionnement du réseau : SSID (*Service Set Identifier*), débit, sécurité. Une station peut également découvrir le réseau de manière active en envoyant des requêtes de sondage. L'AP y répond par une trame de sondage qui contient les mêmes informations qu'une trame balise. Après la découverte, les stations et les AP échangent des trames d'authentification dont le nombre et la complexité dépendent du mécanisme utilisé : WPA, EAP (*Extended Authentication Protocol*), *radius*. Lorsque la phase d'authentification est clôturée avec succès, les stations s'associent à l'AP et échangent les paramètres de communication qu'ils vont utiliser dans leurs échanges. Durant cette phase, l'AP alloue un identifiant unique à la station. Cet AID est équivalent au numéro d'un port physique d'un commutateur dans un réseau *Ethernet* [103].

La norme 802.11ah doit assurer et gérer la connexion de nombreuses stations, ce qui peut poser un problème de latence lorsque les demandes d'association sont conséquentes. La norme 802.11ah propose deux méthodes d'authentification. Avec la méthode centralisée (*Centralized Authentication Control* ou CAC), l'AP fixe un seuil de contrôle d'authentification et le transmet aux stations, à travers les trames balise. Une station ne peut s'associer que si sa valeur est inférieure à ce seuil. Dans le cas contraire, elle reporte l'association jusqu'à la réception de la balise suivante. Le seuil doit être ajusté dynamiquement par l'AP afin de limiter le nombre de stations accédant au canal dans un intervalle de balise et s'assurer que toutes les stations peuvent s'associer aussi rapidement que possible. Avec la méthode décentralisée (*Distributed Authentication Control* ou DAC), l'AP propose plusieurs créneaux de contrôle d'authentification. Les stations choisissent au hasard un intervalle de balise et une valeur aléatoire. Si elle est supérieure au seuil, la station retente sa chance dans le créneau suivant. La solution proposée réduit le délai d'association global en réduisant le nombre de STA qui feraient des demandes simultanées [87, 115, 118].

2.3.6 Mécanisme d'identification AID

La norme 802.11ah utilise des adresses MAC sur 48 bits pour identifier les équipements et faire le lien avec la couche réseau. Au moment de l'association, une station est également identifiée par un AID. La structure de cet identifiant a été modifiée pour assurer la connexion d'un grand nombre de stations. Dans un réseau Wi-Fi "classique", chaque STA est identifié par un AID codé sur 11 bits. Le nombre de STA associées s'élève au maximum à $2^{11} = 2048$. Avec la norme 802.11ah, l'AID est codé sur 13 bits, ce qui porte le nombre maximum de STA associées à $2^{13} = 8192$ [87, 119].

La norme 802.11ah prévoit également de regrouper les STA en fonction de leur trafic, de leur zone géographique ou de leurs besoins en énergie. Une structure hiérarchique de l'AID a été proposée afin de réaliser des regroupements de stations en fonction des besoins [86, 87]. La figure 2.14 représente la structure de l'AID.

L'AID est divisée en pages et en blocs. Chaque bloc contient 8 sous-blocs de 8 stations. Le nombre de pages et de blocs est variable et peut être configuré par les opérateurs de réseau. Le regroupement est utilisé pour réduire le nombre d'occurrences lorsqu'il est nécessaire de référencer des groupes de stations.

2.3.7 Structure des trames de couche MAC

La norme 802.11ah est compatible avec la pile protocolaire TCP/IP. Une trame MAC est constituée par un en-tête, un champ de données en provenance de la couche IP (*MAC Service Data Unit* ou MSDU) et une séquence de vérification de la trame (*Frame Check Sequence* ou FCS). La structure d'une trame MAC est présentée à la figure 2.15 [99, 100, 107, 117].

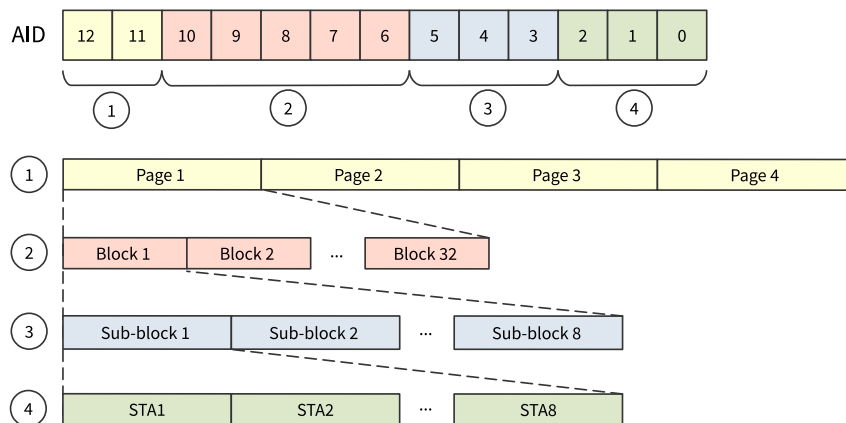


FIGURE 2.14 – Architecture du mécanisme d’identification AID.

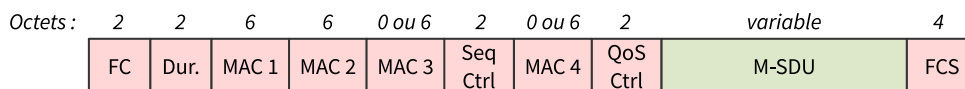


FIGURE 2.15 – Structure d’une trame de données MAC 802.11ah.

Le champ *Frame Control* (FC) contient des informations sur le type et la structure de la trame. Le champ *Duration* est utilisé pour activer et configurer le mécanisme NAV. Le nombre d’adresses MAC varie entre un et quatre, en fonction du type de trame et de sa destination. Le champ *Sequence Control* (SC) numérote chaque séquence de transmission et chaque fragment de trame. Un champ supplémentaire est ajouté aux trames QoS, il contient des informations sur la catégorie QoS et le type d’accusé de réception demandé [99, 100, 107, 117].

2.3.8 Fragmentation et agrégation des trames de couche MAC

En fonction de la qualité du support et des conditions de transmission, un équipement 802.11ah peut fragmenter ou agréger les trames de couche MAC. La fragmentation découpe le MSDU en plusieurs MPDU. L’objectif est d’accroître la fiabilité des transmissions lorsque les caractéristiques du canal limitent l’envoi de trames longues. La fragmentation et la défragmentation sont effectuées au niveau de l’émetteur et du destinataire immédiat, en fonction d’un seuil défini en octets [99, 100, 107, 117].

A l’inverse, l’agrégation permet à un équipement de transmettre plusieurs MSDU dans une trame de couche physique. L’objectif est d’augmenter le débit de données afin de tendre vers celui de la couche PHY. Deux schémas d’agrégation ont été adoptés par la norme 802.11ah, comme présentés sur la figure 2.16.

Le premier schéma se situe dans la partie haute de la couche MAC. Il permet de regrouper plusieurs MSDU dans une trame agrégée A-MSDU (*Aggregate MSDU*). Les adresses de la source (SA) et de la destination (DA) finale ainsi que la longueur du paquet sont ajoutées à chaque

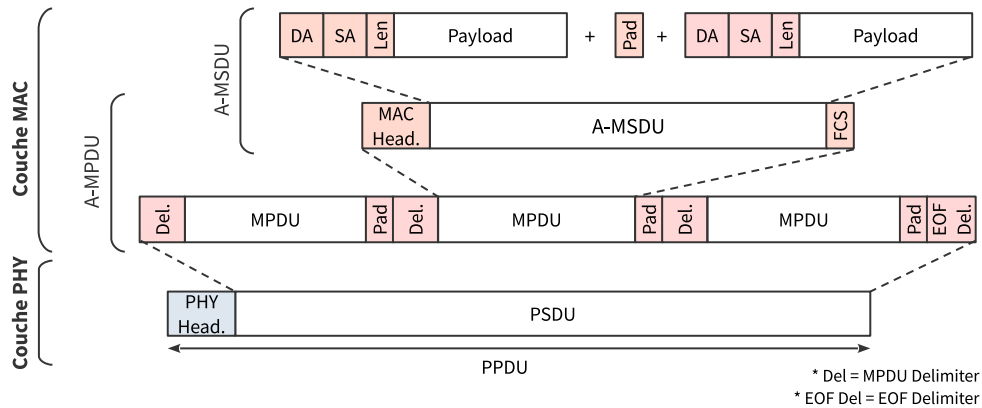
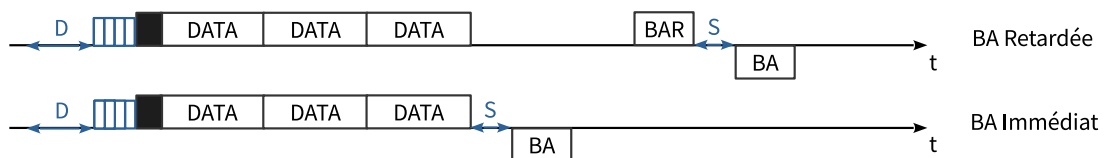


FIGURE 2.16 – Schémas d'agrégation d'une trame 802.11ah.

MSDU. La longueur d'une trame A-MSDU est limitée par la taille maximale du MPDU, supportée par la station destinatrice. Le second schéma se trouve dans la partie basse de la couche MAC. Il permet d'agréger plusieurs MPDU dans une trame A-MPDU (*Aggregate MPDU*). Les MPDU sont séparés par des délimiteurs qui contiennent la longueur de chaque paquet, un code correcteur d'erreurs et une signature. Pour être agrégées, les trames MSDU et MPDU doivent toutes avoir la même destination, et appartenir à la même catégorie QoS. Une trame PSDU sans agrégation a une longueur maximale de 511 octets. Une trame PSDU avec agrégation a une longueur maximale de 797 159 octets, soit 511 symboles. La durée maximale d'une trame PPDU est limitée à 27 920 μ s [107, 117].

2.3.9 Accusés de réception par blocs

Pour transmettre des trames agrégées, un émetteur et un récepteur doivent au préalable établir une session *Block Ack* (BA). Celle-ci est initiée et clôturée par l'envoi de trames spécifiques *AddBA* et *DelBA*. Lorsque la session est établie, l'émetteur peut envoyer des trames agrégées, qui seront accusées en réception par une trame BA. La figure 2.17 représente les deux types de session *Block Ack* proposées par la norme 802.11ah [86, 87, 99, 100].

FIGURE 2.17 – Principe de fonctionnement d'une session *Block Ack*.

Une trame BA permet de valider la réception des différents paquets contenus dans la trame agrégée, ou des différentes trames reçues durant une session TxOP. Elle est transmise immédiatement après la réception de la trame agrégée, ou retardée et soumise à la demande de l'émetteur

qui envoie pour cela une trame *Block Ack Request* (BAR). Les trames BA et BAR contiennent le numéro de séquence du premier paquet et la validation du FCS de chaque paquet [87, 99, 100].

2.4 Mécanismes d'optimisation énergétique du 802.11ah

Le CSMA/CA peut consommer une part importante des ressources énergétiques, notamment lorsqu'il y a une multiplication des collisions sur le canal. Pour minimiser cette consommation, plusieurs mécanismes ont été proposés par la norme 802.11ah.

2.4.1 Modes de fonctionnement d'une station 802.11ah

Une station 802.11ah possède deux modes de fonctionnement. En mode actif, elle est continuellement dans un état de réception et l'AP peut lui envoyer des trames à tout moment. En mode économie d'énergie, la station est plus souvent positionnée dans un état de veille ou de sommeil. L'AP doit attendre une phase de réveil pour lui envoyer des trames. Au moment de son réveil, une station ne peut pas accéder directement au média car il peut être utilisé ou réservé par une autre station. Elle doit attendre l'expiration d'un délai de sondage, ou la transmission d'un autre appareil, avant de lancer une procédure d'accès au média [100, 120, 121].

2.4.2 Mécanismes d'économie d'énergie hérités du 802.11

La norme 802.11ah hérite des différents mécanismes d'économie d'énergie qui ont été définis par les précédents amendements de la norme 802.11. Le premier à avoir été mis en œuvre est le mécanisme *PS-poll*. Il permet à une station en mode "économie d'énergie" de signaler son réveil à l'AP, par la transmission d'une trame de contrôle *PS-poll*. L'AP peut alors lui transmettre ses trames, qui ont été temporairement stockées en mémoire. La STA doit envoyer une trame *PS-poll* pour chaque trame en mémoire dans l'AP. S'il n'y a pas de trames, l'AP envoie un ACK et la station peut retourner dans un état de sommeil. La norme impose aux stations de se réveiller au moins une fois par intervalle de temps TBTT (*Target Beacon Transmission Time*) [99, 100, 120, 121].

Le mécanisme de livraison automatique APSD (*Automatic Power Save Delivery*) a été introduit par l'amendement 802.11e dans une version programmée (S-APSD) et non-programmée (U-APSD). L'APSD fonctionne sous la forme d'une session durant laquelle une station doit rester éveillée afin de recevoir toutes les trames stockées en mémoire. Les trames échangées durant une période de service (*Service Period* ou SP) font partie de la même catégorie QoS et la durée des SP est négociée lors de la phase d'association.

Avec l'U-APSD, la station informe l'AP de son réveil et du début de la période, par la transmission de n'importe quelle trame de gestion, de contrôle ou de données. L'AP indique la

fin de la période en modifiant le bit EOSP (*End Of Service Period*) du champ QoS de l'en-tête MAC. Le mécanisme S-APSD fonctionne de manière identique mais les SP sont programmées dans le temps par l'AP, de manière implicite ou explicite. En mode implicite, les SP sont séparées par des intervalles de temps réguliers et la station peut retourner dans un état de sommeil si l'AP n'a pas de trames en mémoire. En mode explicite, l'AP définit la prochaine SP à la fin de chaque période. La station doit donc rester éveillée jusqu'à la fin de la SP afin de recevoir l'échéance de la prochaine [99, 100, 120, 121].

2.4.3 Le mécanisme d'indication virtuel TIM

En Wi-Fi "classique", les trames balise contiennent des éléments TIM qui servent à informer les stations en mode économie d'énergie qu'il y a des trames en mémoire tampon dans l'AP. Ces informations sont contenues sous la forme d'une carte ou d'un tableau virtuel dans lequel chaque station est indexée par le positionnement d'un bit. Pour recevoir les données mises en mémoire par l'AP, les stations doivent se réveiller et recevoir les trames balise contenant les éléments TIM. Si le bit correspondant à la station est à 0, la station retourne dans un état de sommeil. Si le bit est à 1, la station envoie une trame *PS-poll* ou APSD. L'AP lui répond avec la ou les trames de données mises en mémoire tampon [99, 100, 120].

Les réseaux 802.11ah doivent gérer un grand nombre de stations et la taille des éléments TIM contenus dans les trames balise dépend de ce nombre. Les stations, qui doivent économiser leurs ressources en énergie, ne peuvent pas se réveiller pour recevoir toutes les trames balise. De plus, la longueur de ces trames aurait un impact sur leurs temps de réveil et donc leur consommation d'énergie. La norme 802.11ah a prévu un mécanisme de segmentation des éléments TIM afin de permettre aux différentes stations de ne pas se réveiller pour recevoir toutes les trames balise mais également diminuer la taille des éléments TIM contenus dans chaque trame balise. La Figure 2.18 illustre un exemple de fonctionnement du mécanisme TIM pour la norme 802.11ah.

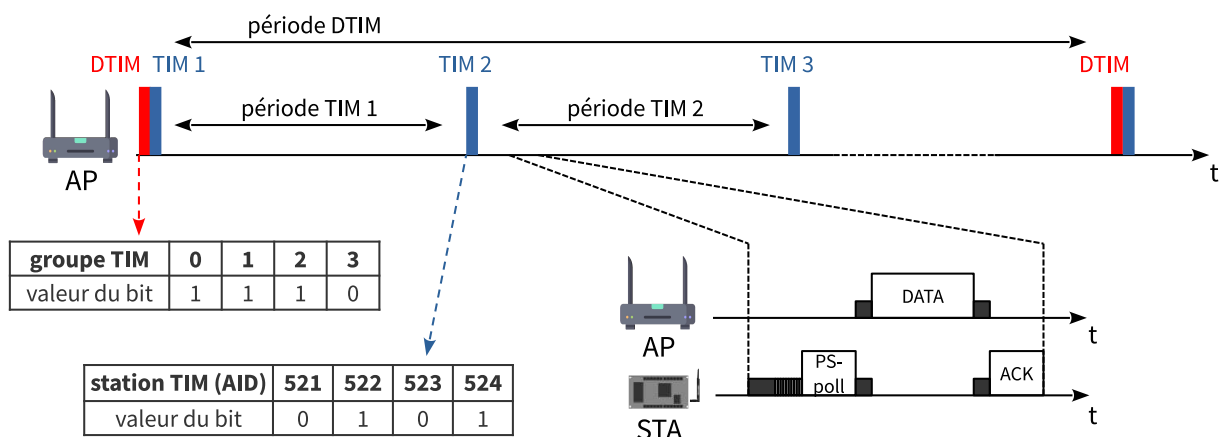


FIGURE 2.18 – Principe de fonctionnement du mécanisme TIM.

La carte d'indication virtuelle TIM est segmentée et chaque segment est transmis dans une trame balise unique. Une trame balise DTIM (*Delivery Target Indication Map*) est envoyée au début de chaque période. Elle contient la liste des groupes de stations qui ont des trames en attente, et les trames balise TIM contiennent la liste des STA du groupe concerné. Sur la figure 2.18, la station 522 se réveille pour recevoir la balise DTIM. Elle est informée que des données se trouvent en mémoire tampon pour son groupe et qu'il doit se réveiller afin de recevoir la trame balise TIM2. La station 522 se réveille pour recevoir la trame balise TIM2 puis, comme elle est indexée dans la carte virtuelle, elle envoie une trame *PS-poll* pour recevoir ses données stockées en mémoire tampon. Les stations du groupe 3 et les stations 521 et 523 peuvent rester dans un état de sommeil jusqu'à la prochaine annonce DTIM [86, 87, 101, 115, 120, 122].

2.4.4 Les mécanismes d'optimisation du taux d'occupation du canal

Les données transmises par un équipement IoT peuvent être courtes, de l'ordre de quelques dizaines ou centaines d'octets. Dès lors, l'en-tête MAC et les trames de contrôle du protocole Wi-Fi (PV0 ou *Protocol Version 0*) représentent une partie importante des informations échangées, ce qui détériore le taux d'occupation du canal. La norme 802.11ah a défini deux solutions pour réduire la longueur des trames. La première (PV1 ou *Protocol Version 1*) réduit la taille de l'en-tête MAC des trames de données et la structure de certaines trames de contrôle et de gestion. La taille de l'en-tête PV1 varie entre 10 et 24 octets. Les champs de durée et de contrôle QoS sont supprimés et les adresses MAC remplacées par un identifiant court, sur deux octets [86, 87, 104, 114]. La norme 802.11ah prend en charge les en-têtes PV0 et PV1.

La seconde solution (*Null Data Packet* ou NDP) supprime l'en-tête MAC de certaines trames de contrôle et de gestion. Les informations utiles de la couche MAC sont placées dans le champ SIG de la couche physique. La taille des trames NDP est égale à la longueur de la trame de couche physique : 6 symboles (soit 240 μ s) pour une bande passante supérieure ou égale à 2 MHz et 14 symboles (soit 560 μ s) pour une bande passante à 1 MHz. Cependant, les trames NDP ne peuvent pas activer le mécanisme NAV des autres stations. Le mécanisme RID (*Response Indication Deferral*) a été proposé pour le remplacer. Il est codé sur 2 bits et complète l'utilisation du NAV en indiquant le type de réponse attendue : une réponse normale avec un ACK, une réponse NDP avec un NDP-ACK, pas de réponse pour les trames de diffusion et une réponse longue pour une session TxOP. Le RID optimise les temps de réveil car il est configuré après la réception de l'en-tête physique. Le NAV est configuré après la réception de la totalité de la trame [86, 87, 104, 114].

2.4.5 Le mécanisme d'accès au media RAW

Le RAW est un mécanisme qui offre une équité d'accès au média à un grand nombre de stations en réduisant les risques de collision. Le RAW est lié au mécanisme TIM. Il est dédié

au trafic en voie montante et le TIM au trafic en voie descendante. Les stations RAW sont divisées en groupes et l'AP alloue à chaque groupe, un créneau temporel dans lequel seules les stations assignées à ce groupe sont autorisées à accéder au média. Le mécanisme RAW peut être vu comme la combinaison du CSMA/CA et du TDMA. La figure 2.19 illustre un exemple de fonctionnement des mécanismes TIM et RAW [86, 87, 114, 120, 123].

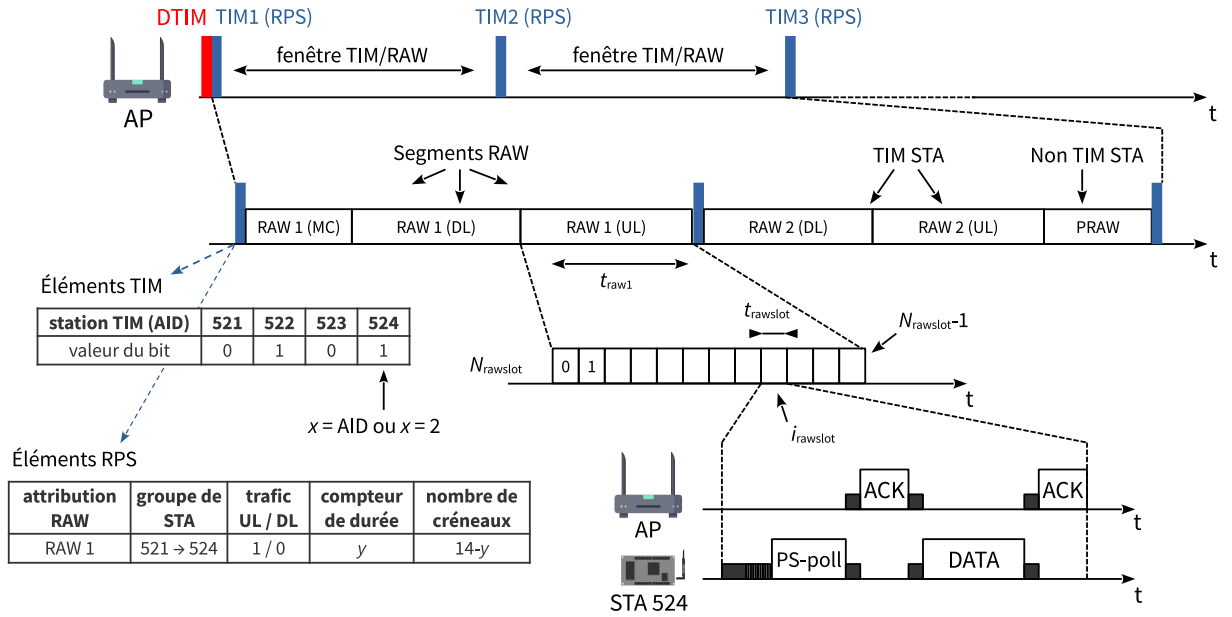


FIGURE 2.19 – Principe de fonctionnement du mécanisme RAW.

Les stations sont regroupées en fonction de leurs besoins, à l'aide de la structure hiérarchique de l'AID. La période DTIM est segmentée et chaque groupe dispose de sa propre fenêtre RAW pour accéder au média. Les groupes peuvent être divisés en sous-groupes et les fenêtres en segments. Chaque sous-groupe est alors affecté à un segment particulier. Les segments peuvent à leur tour être divisés en créneaux dans lequel une ou plusieurs stations est autorisée à accéder au média. Les segments sont dédiés soit à la transmission, soit à la réception de données et les créneaux sont d'une durée équivalente. L'AP peut recomposer les groupes et les sous-groupes à chaque période DTIM [86, 87, 115, 120, 123].

Les trames balise transportent les éléments TIM auxquels s'ajoute un jeu de paramètres RPS (*RAW Parameters Set*). Ces derniers contiennent les informations relatives aux créneaux et aux groupes de stations pour le trafic en voie montante [86, 87, 115, 120, 123].

Sur la figure 2.19, le groupe de stations identifiées par les AID 521 à 524 est affecté au RAW1. Ce segment est divisé en $N_{rawslot}$ créneaux et la station 524 est affectée au créneau d'indice $i_{rawslot}$. Cet indice est déterminé de manière pseudo-aléatoire par l'équation (2.17) :

$$i_{rawslot} = (x + N_{offset}) \bmod N_{rawslot}, \quad (2.17)$$

où i_{rawslot} et N_{rawslot} correspondent respectivement à l'index et au nombre de créneaux. x est égal à la valeur de l'AID ou à la position de l'index dans la carte d'indication TIM. N_{offset} offre une équité d'accès à toutes les stations en prenant une valeur pseudo-aléatoire égale aux deux derniers octets du FCS de la trame balise. Le nombre et la durée des créneaux sont contenus dans les éléments RPS, et obtenus par les équations (2.18) et (2.19) :

$$t_{\text{rawslot}} = 500 \mu\text{s} + C \cdot 120 \mu\text{s}, \quad (2.18)$$

$$t_{\text{raw}} = t_{\text{rawslot}} \cdot N_{\text{rawslot}}, \quad (2.19)$$

où C est un coefficient qui permet de déterminer la durée et le nombre de créneaux. C est défini sur 8 ou 11 bits. Chaque segment RAW peut contenir un maximum de 2^{14-y} créneaux et C peut prendre une valeur maximale égale à $2^y - 1$. Si $y = 8$ bits, le segment RAW est composé au maximum de 64 créneaux d'une durée maximale de 31,1 ms et si $y = 11$ bits, le segment est composé au maximum de 8 créneaux d'une durée maximale de 246,14 ms. Au début de chaque segment, l'AP diffuse une trame de synchronisation. Par conséquent, les STA n'ont pas besoin d'attendre un délai de sondage, elles peuvent détecter la disponibilité du canal et commencer leur transmission directement. La norme 802.11ah impose aux STA d'utiliser les mécanismes DCF ou EDCA à l'intérieur des créneaux RAW [86, 87, 115, 123].

Les STA sont autorisées à déborder de leurs créneaux si le paramètre CSB (*Cross Slot Boundary*) est activé dans la trame balise TIM. Dans ce cas, les stations doivent respecter le délai de sondage afin de vérifier que le canal est libre avant d'émettre. Dans le cas contraire, chaque station est contrainte dans son propre créneau et les stations du créneau suivant peuvent démarrer leur transmission sans délai de sondage [86, 87, 115, 123].

Une station TIM qui utilise le mécanisme RAW dispose de deux compteurs de fenêtre de contention. Un compteur est utilisé uniquement dans les créneaux RAW et l'autre pendant les périodes non restreintes, où toutes les stations peuvent accéder au média. Le compteur RAW est réinitialisé au début de chaque fenêtre RAW. Le compteur "régulier" est gelé durant les créneaux RAW et reprend sa valeur au début de la période sans restriction. Enfin, un AP peut affecter une fenêtre RAW sans restriction aux STA non programmées (*Unscheduled STA*) et/ou un segment PRAW (*Periodic Restricted Access Window*) aux STA non-TIM qui utilisent le mécanisme TWT [86, 87, 122, 123].

2.4.6 Le mécanisme d'accès au media TWT

Le TWT est un mécanisme qui permet aux stations d'optimiser leurs consommations d'énergie en négociant leurs périodes de réveil directement avec l'AP. Ce mécanisme peut être utilisé pour le trafic montant et descendant. Une station TWT a l'obligation de se réveiller pour les

périodes de service qui ont été négociées, mais pas pour recevoir les trames balise TIM. Elle peut donc maximiser son temps d'inactivité [86, 87, 107, 115]. La figure 2.20 présente un exemple de fonctionnement du mécanisme TWT.

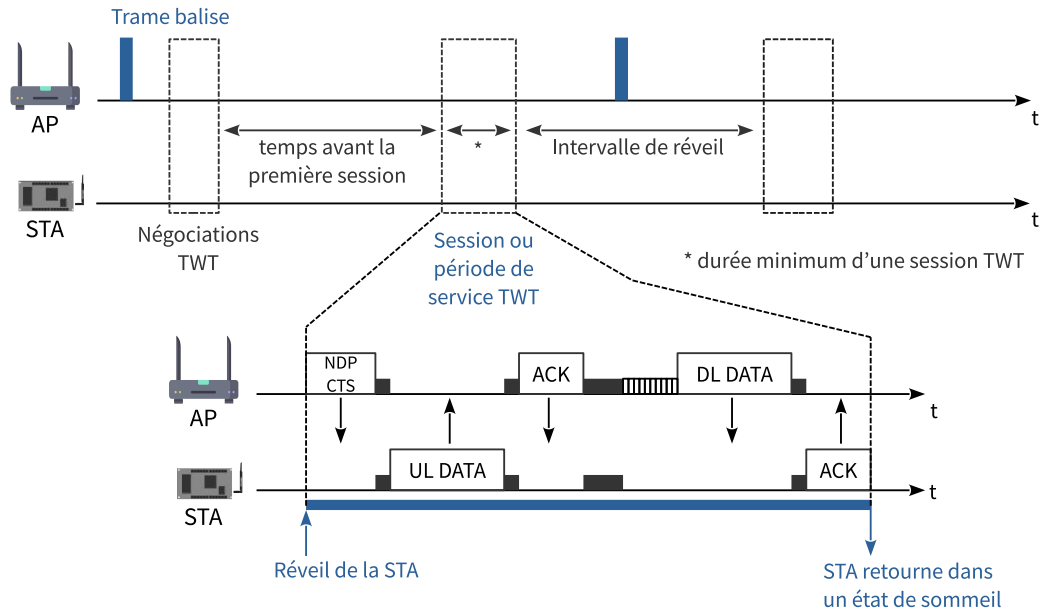


FIGURE 2.20 – Principe de fonctionnement du mécanisme TWT.

Les sessions TWT sont négociées en amont entre la station et l'AP. Durant cette négociation, ils définissent un certain nombre de paramètres, tels que l'intervalle de temps entre deux sessions TWT, le moment du premier réveil et la durée minimum de la période de service (SP). La station est à l'initiative des négociations et l'AP peut accepter, rejeter ou suggérer ses propres conditions [100, 120].

Les sessions TWT sont caractérisées de la manière suivante :

- *Implicit/Explicit* : Une session implicite est périodique. La station détermine la prochaine période de service en ajoutant un intervalle de temps moyen et régulier à son horloge. Une session explicite est aperiodique. À chaque échéance, la station doit négocier avec l'AP le début de la prochaine période de service.
- *Announced/Unannounced* : Avec une session "annoncée", la station doit envoyer une trame *PS-poll* ou APSD au début de la période de service pour signaler son réveil à l'AP. Avec une session "non annoncée", l'AP peut envoyer une trame de données sans attendre une trame *PS-poll* ou APSD. La STA doit donc obligatoirement être réveillée au début de la période de service.

Pendant une période de service, la station n'a pas de privilèges pour accéder au média. Elle n'a aucune garantie que la période de service ait été accordée à son usage unique. Elle peut cependant demander à l'AP d'assurer la protection de la session en allouant un segment PRAW.

Elle peut également demander à l'AP de transmettre une trame de synchronisation à l'heure de réveil cible de la STA, et ce afin de l'aider à se synchroniser. L'AP doit utiliser une trame NDP-CTS comme trame de synchronisation [107]. Durant une période de service, les STA ont l'obligation d'utiliser les mécanismes DCF/EDCA pour accéder au média. La norme 802.11ah limite à 8, le nombre d'accords TWT négociés par station [86, 87, 107, 115].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents mécanismes utilisés par le protocole Wi-Fi HaLow pour assurer les transmissions de données dans l'IoT. Ces opérations sont complexes et couvrent les deux couches d'accès au media du protocole. Au niveau de la couche PHY, les transmissions sont réalisées dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz avec une modulation OFDM, et ce afin d'augmenter la portée de transmission tout en minimisant la consommation d'énergie. Au niveau de la couche MAC, le protocole 802.11ah définit un certain nombre de mécanismes qui favorisent la gestion d'un nombre important de dispositifs (AID, TIM) et optimisent la consommation d'énergie (TWT, TIM, RAW). La portée est évaluée à 1 km, le débit à 78 Mbit/s et la latence à quelques millisecondes, ce qui fait du protocole Wi-Fi HaLow une solution IoT longue portée prometteuse en termes de débit et de latence.

Nous avons étayé les descriptions par de nombreuses références et nous avons posé les premières bases théoriques. Ces dernières seront utilisées dans les chapitres suivants pour introduire la première modélisation et la première qualification des caractéristiques du protocole 802.11ah qui s'appuient sur des expérimentations (chapitres 3 et 4). Avec une portée évaluée à 1 km, le Wi-Fi HaLow est considéré comme un protocole à longue portée, nous avons donc décidé de le comparer avec le protocole LoRa/LoRaWAN dans le chapitre 6, que nous aurons préalablement qualifié et présenté dans le chapitre 5.

MESURES ET MODÉLISATION DES PERFORMANCES DU PROTOCOLE 802.11AH

Introduction

Le protocole Wi-Fi HaLow est considéré comme la technologie LPWAN qui offre le meilleur débit de transmission et la plus faible latence. Sa portée est estimée à 1 km et son débit entre 150 kbit/s et 78 Mbit/s. La communauté scientifique a été particulièrement productive dans le développement et la simulation de modèles mathématiques. Cependant, les performances de ce protocole n'ont jamais été validées par des expériences en situation réelle, en raison du manque d'équipement sur le marché. La norme a été achevée en 2017, et les premières solutions commencent tout juste à être commercialisées.

Dans ce chapitre, nous utilisons un équipement intégrant la puce *Newracom* NRC-7292 pour effectuer des mesures et valider les caractéristiques théoriques du protocole Wi-Fi HaLow et son utilisation dans les domaines de l'IoT. Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Un état de l'art est proposé dans la partie 3.1. Les aspects théoriques relatifs aux expériences sont fournis dans les parties 3.2 et 3.3. La partie 3.4 présente des mesures in situ, permettant d'évaluer les performances du Wi-Fi HaLow et de les comparer avec les résultats théoriques. Enfin, les domaines d'utilisation de ce protocole sont discutés dans la partie 3.5.

3.1 État de l'art

Dans la littérature, de nombreux travaux présentent une vue d'ensemble de la norme 802.11ah, ses aspects techniques et ses nouveaux mécanismes y sont présentés [87, 101-104, 114, 117, 124, 125]. Les références [122, 123] complètent leur étude par une évaluation des performances pour quatre cas d'usage de l'IoT. Dans l'article [126], le débit théorique et la portée de transmission sont évalués et dans l'article [86], les défis de la couche MAC sont identifiés afin de proposer plusieurs facteurs d'amélioration. D'autres travaux fournissent une analyse approfondie du pro-

protocole [119, 127-130]. Un modèle mathématique est présenté dans l'article [131] afin d'estimer le débit de données. Le MCS10 est analysé et simulé dans l'étude [132] et les références [133-135] analysent le cycle de service et le fonctionnement du mécanisme TWT. Certains travaux se concentrent sur l'optimisation des mécanismes avec pour objectif l'amélioration des performances [136-140]. Les articles [141-144] traitent de l'optimisation des créneaux RAW. Les articles [145, 146] proposent des solutions pour réduire la latence et gérer la problématique des nœuds cachés. Toutes ces études confirment que la norme 802.11ah est l'une des technologies les plus prometteuses de l'IoT, en termes de mise à l'échelle, de portée et d'efficacité énergétique, mais ses performances sont généralement évaluées à l'aide d'outils de simulation.

Seuls quelques travaux présentent des mesures en laboratoire ou sur le terrain. Les références [109, 112] évaluent plusieurs modèles de propagation avec un kit de démarrage Silicon Labs EZR32 et une carte 802.15.4g OpenMote B. Dans l'article [55], un circuit Texas Instruments CC1312R Sub-1GHz est utilisé pour valider les caractéristiques de la couche MAC. Dans l'article [113], une solution basée sur un module USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) est mis en œuvre pour tester la portée et le PER dans différents environnements. Les auteurs de ces travaux admettent que les modules utilisés n'offrent qu'une prise en charge partielle de la norme 802.11ah, ou qu'ils ne peuvent être utilisés que dans le cadre d'expériences en laboratoire. À notre connaissance, l'article [106] est le seul à proposer des mesures de métriques avec du matériel spécifiquement développé pour la norme 802.11ah, mais le travail se limite à la faisabilité de cette technologie dans les applications IoT.

Dans ce chapitre, des études de performance sont réalisées dans un environnement réel. Ce besoin a été exprimé dans la littérature afin de motiver une adoption plus rapide de cette technologie [86, 87, 117]. Les tests sont effectués à l'aide d'un équipement considéré comme un véritable dispositif IoT, et non comme du matériel de laboratoire. En fait, les premières solutions basées sur ce matériel commencent à apparaître sur le marché [115, 147]. Dans notre travail, le RSSI, le RTT (*Round Trip Time*) et le débit de données sont acquis pour différentes caractéristiques de transmission, dans des environnements intérieurs et extérieurs. Ces mesures permettent de valider la théorie décrite dans la norme et de proposer deux modèles de propagation pour la bande de fréquences EU-868.

3.2 Choix des métriques étudiés pour le protocole 802.11ah

Dans les systèmes de communication sans fil, une des premières métriques à étudier est le **portée de transmission**, qui est conditionnée par le modèle de propagation. La prédiction de l'intensité du signal reçu est nécessaire pour planifier un système de communication avec un régime de performances optimales. Dans cette étude, les modèles proposés par le TGah sont comparés à des modèles générés par les mesures.

Un protocole de communication doit également assurer un **débit de données** suffisant, qui dépend du service à fournir. En raison des ressources limitées et du grand nombre de dispositifs, un protocole IoT doit minimiser les durées d’occupation du média. Dans cette étude, le débit utile est mesuré au niveau de la couche transport par un échange de paquets entre une STA et un AP.

La **latence** est un facteur critique qui détermine l’efficacité des services offerts. Elle est due aux retards d’accès au canal et à l’encombrement du réseau, mais elle n’est pas forcément liée au débit. Il est toujours souhaitable de réduire la latence d’accès au média, en particulier lorsque le nombre de nœuds du réseau augmente. Dans cette étude, la latence est mesurée au niveau de la couche réseau par la mesure du temps d’aller-retour d’un échange entre une STA et un AP.

Le **PER** est la dernière métrique mesurée. Elle est liée à la qualité du canal de transmission et impacte dans une certaine mesure la portée, le débit et la latence. Une station va mesurer en continu le PER et modifier ses caractéristiques de transmission lorsqu’il dépasse un certain seuil. Dans cette étude, le PER, le SNR (*Signal Noise Ratio*) et le RSSI sont mesurés au niveau de la couche MAC.

3.3 Définition théorique des métriques du protocole 802.11ah

Une transmission 802.11ah est caractérisée par une combinaison de cinq bandes passantes, une dizaine de MCS et deux intervalles de garde. Lorsque la distance augmente, la qualité de la liaison diminue et le PER augmente. La station va automatiquement adapter le MCS et l’intervalle de garde en fonction du PER. La portée, le débit, la latence et les pertes de paquets dépendent donc directement de ces combinaisons de caractéristiques. Dans cette partie, nous définissons les métriques d’un point de vue théorique pour pouvoir ensuite les comparer à des mesures en situation réelle.

3.3.1 Définition de la taille et du format des trames

Dans les expérimentations, les mécanismes RTS/CTS et NDP-ACK sont configurés pour l’accès au média et l’accusé de réception. La structure générale des trames de données, agrégées ou non, est représentée sur les figures 3.1 et 3.2. La structure des trames RTS, NDP-CTS et NDP-ACK est représentée sur la figure 3.3. Une présentation plus détaillée du matériel est faite dans la partie 3.4.

La couche PHY est composé de trois champs, qui ont été décrits dans la partie 2.2.4. Le STF est utilisé pour détecter le début de la trame et ajuster automatiquement le gain du récepteur, le LTF pour la synchronisation temporelle, l’estimation du canal et du décalage de fréquence. Le champ SIG contient le débit et la longueur de la trame. Le nombre de symboles (N_{stf} , N_{ltf1} , N_{sig}) et leur durée (t_{stf} , t_{ltf1} , t_{sig}) sont référencés dans le tableau 3.1 pour une largeur de bande

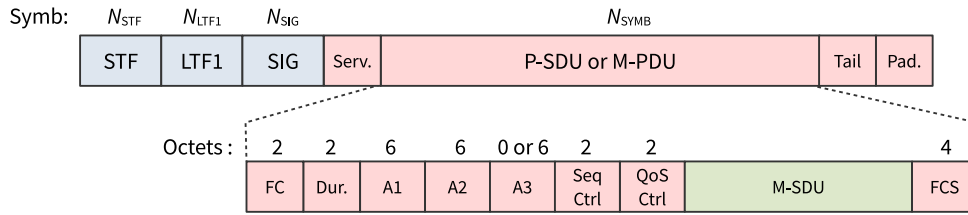


FIGURE 3.1 – Format des trames de données 802.11ah utilisées dans les expériences.

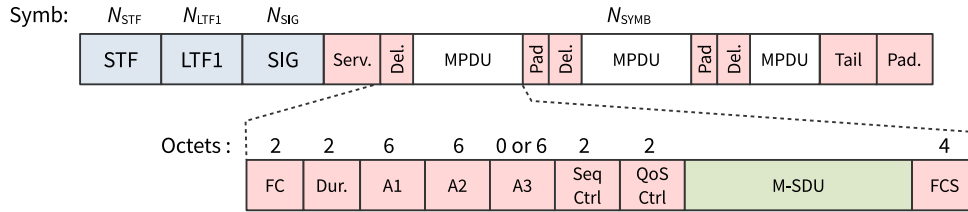


FIGURE 3.2 – Format des trames de données agrégées 802.11ah utilisées dans les expériences.

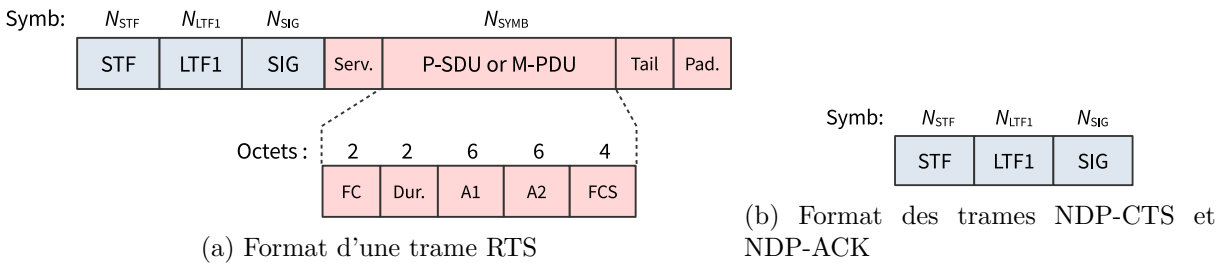


FIGURE 3.3 – Format des trames RTS, NDP-CTS et NDP-ACK 802.11ah utilisées dans les expériences.

de 1 et 2 MHz.

TABLEAU 3.1 – Nombre de symboles OFDM et durée de l'en-tête PHY.

Bande passante	Format de la trame PHY	$N_{stf} (t_{stf})$	$N_{lft1} (t_{lft1})$	$N_{sig} (t_{sig})$
1 MHz	S1G_1M	4 (160 μ s)	4 (160 μ s)	6 (240 μ s)
2 MHz	S1G_SHORT	2 (80 μ s)	2 (80 μ s)	2 (80 μ s)

Le groupe de travail TGah a identifié un problème de sécurité avec l'en-tête MAC PV1 [148, 149]. La solution MAC PV0 a donc été privilégiée dans la mise en œuvre des expériences. Le champ FC indique le type de trame, le champ *Duration* permet de définir le mécanisme NAV, SC attribue un numéro à chaque trame échangée, *QoS Control* contient des informations sur la qualité de service et les adresses MAC permettent d'identifier les sources et les destinations. Le tableau 3.2 contient le nombre d'octets transportés dans les trames de données et les trames de contrôle durant les expérimentations.

TABLEAU 3.2 – Nombre d’octets des champs de l’en-tête et des trames MAC.

	FC	Dur.	A1	A2	A3	Seq Ctrl	QoS Ctrl	MSDU	FCS
RTS	2	2	6	6	0	0	0	0	4
NDP-CTS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DATA	2	2	6	6	6	2	2	481	4
NDP-ACK	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les trames NDP n’ont pas d’en-tête MAC. Un certain nombre d’informations contenues dans les champs MAC a été déplacé dans le champ SIG, comme indiqué dans la partie 2.4.4. Les trames agrégées contiennent plusieurs paquets de 445 octets de données, auxquels il faut ajouter 8 octets d’en-tête de couche UDP, 20 octets de couche IP, 8 octets de LLC (*Logical Link Control*), 30 octets de couche MAC ainsi que les quatre octets de délimitation entre chaque paquet. Le nombre de symboles transmis dans chaque trame est obtenu avec l’équation (3.1) :

$$N_{\text{sym}} = m_{\text{stbc}} \cdot \left\lceil \frac{8 \cdot \text{MPDU} + N_{\text{serv}} + N_{\text{tail}} \cdot N_{\text{es}}}{m_{\text{stbc}} \cdot N_{\text{dbps}}} \right\rceil, \quad (3.1)$$

où N_{sym} , m_{stbc} , MPDU, N_{serv} , N_{tail} , N_{es} et N_{dbps} désignent respectivement le nombre de symboles dans la trame, le codage par blocs spatio-temporels, l’unité de données du protocole MAC, le nombre de bits dans les champs de *service* et *tail*, le nombre de codeurs BCC et le nombre de bits de données par symbole. Les dispositifs utilisés dans les expériences sont équipés d’une seule antenne : $m_{\text{stbc}} = 1$, $N_{\text{serv}} = 8$ bits, $N_{\text{es}} = 1$ et $N_{\text{tail}} = 6$ bits [101, 107].

3.3.2 Définition du temps d’aller-retour d’une trame

La latence d’un réseau peut être définie comme le temps d’aller-retour d’une trame entre un émetteur et un récepteur. Ce RTT correspond au temps de transmission des trames, auquel il faut ajouter le temps de propagation des ondes électromagnétiques et le temps de traitement des données par les équipements.

La norme 802.11ah exige que les STA utilisent le mécanisme DCF/EDCA pour accéder au média. Le fonctionnement de ces mécanismes a été décrit dans la partie 2.3.3. Pour les expériences menées, les dispositifs sont configurés comme des capteurs avec une catégorie QoS *Best Effort*. Les STA doivent attendre un temps AIFS avant d’accéder au média, plus un temps de recul en cas de collision, de média occupé ou de nouvelle transmission. Ensuite, elles peuvent transmettre la trame de données suivie d’un accusé de réception. Les figures 3.4 et 3.5 représentent les deux types d’échanges qui ont été configurés pour réaliser les expérimentations.

Le RTT est calculé pour un échange avec et sans RTS/CTS, à partir des équations (3.2) et (3.3) :

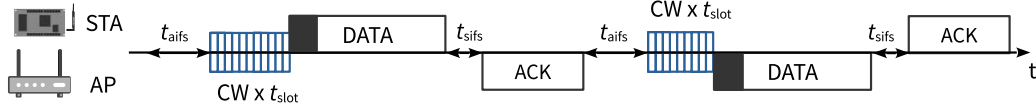


FIGURE 3.4 – Échanges 802.11ah sans utilisation du mécanisme RTS/CTS réalisés dans les expériences.

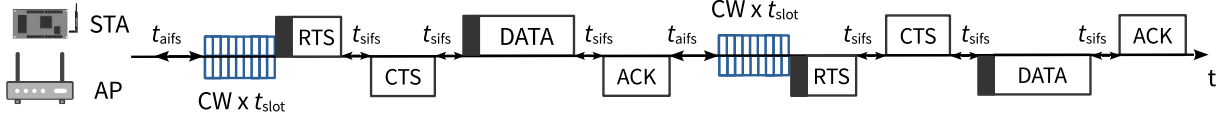


FIGURE 3.5 – Échanges 802.11ah avec utilisation du mécanisme RTS/CTS réalisés dans les expériences.

$$t_{rtt} = 2 \cdot (t_{aifs} + CW \cdot t_{slot} + t_{data} + t_{sifs} + t_{ack}), \quad (3.2)$$

$$t_{rtt_{rts}} = 2 \cdot (t_{aifs} + CW \cdot t_{slot} + t_{rts} + t_{sifs} + t_{cts} + t_{sifs} + t_{data} + t_{sifs} + t_{ack}), \quad (3.3)$$

où t_{rtt} , $t_{rtt_{rts}}$, t_{aifs} , t_{sifs} , $CW \cdot t_{slot}$, t_{rts} , t_{cts} , t_{data} et t_{ack} désignent respectivement le temps d'aller-retour avec et sans RTS/CTS, les temps AIFS et SIFS, la durée de la fenêtre de contention et la durée des trames RTS, NDP-CTS, DATA et NDP-ACK. Les valeurs de CW , t_{slot} , t_{aifs} et t_{sifs} sont renseignées dans le tableau 3.3 pour la catégorie de QoS *Best Effort*. Les valeurs de t_{rts} , t_{cts} , t_{data} et t_{ack} sont obtenues pour un intervalle de garde court et un intervalle de garde long, avec les équations (3.4) et (3.5) :

$$t_{tr_{sgi}} = \begin{cases} t_{stf} + t_{lfl} + t_{sig} & \text{si } N_{sym} = 0 \\ t_{stf} + t_{lfl} + t_{sig} + t_{syml} + t_{syms} \cdot (N_{sym} - 1) & \text{si } N_{sym} > 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$t_{tr_{lgi}} = t_{stf} + t_{lfl} + t_{sig} + t_{syml} \cdot N_{sym}, \quad (3.5)$$

où $t_{tr_{sgi}}$, $t_{tr_{lgi}}$, t_{stf} , t_{lfl} , t_{sig} , t_{syml} , t_{syms} et N_{sym} désignent respectivement le temps de transmission d'une trame avec un GI court et un GI long, la durée des champs STF, LTF et SIG, la durée d'un symbole utilisant un GI long ou un GI court et le nombre de symboles présents dans la trame. $t_{tr_{sgi}}$ et $t_{tr_{lgi}}$ correspondent alternativement à t_{rts} , t_{cts} , t_{data} ou t_{ack} dans les équations (3.2) et (3.3). N_{sym} peut être déterminé par l'équation (3.1). Le tableau 3.1 contient les valeurs de t_{stf} , t_{lfl} et t_{sig} . t_{syml} et t_{syms} sont obtenus par les équations (3.6) et (3.7) :

$$t_{syml} = t_{dft} + t_{gi} \quad \text{avec } t_{gi} = 8 \mu\text{s}, \quad (3.6)$$

$$t_{\text{syms}} = t_{\text{dft}} + t_{\text{gi}} \quad \text{avec } t_{\text{gi}} = 4 \mu\text{s}, \quad (3.7)$$

où t_{dft} et t_{gi} correspondent respectivement à la durée d'un symbole OFDM et à la durée de l'intervalle de garde. t_{dft} est toujours égal à $32 \mu\text{s}$ et t_{gi} est un paramètre configurable, $t_{\text{gi}} = 4 \mu\text{s}$ pour un GI court et $t_{\text{gi}} = 8 \mu\text{s}$ pour un GI long.

TABLEAU 3.3 – Temps d'accès au média d'un capteur 802.11ah pour une catégorie QoS *Best Effort*.

	SIFS (t_{sifs})	SlotTime (t_{slot})	EIFS (t_{eifs})	AIFS (t_{aifs})	CW
Min. Values	160 μs	52 μs	1,384 ms	264 μs	3
Max. Values					15

3.3.3 Définition du débit binaire et du débit de données

Le débit binaire est mesuré au niveau de la couche physique sans tenir compte du code correcteur d'erreurs et de la surcharge des symboles d'entraînement. Il représente le nombre de bits de données de couche MAC transmis par unité de temps. Le débit utile est mesuré au niveau de la couche transport et tient compte des échanges nécessaires au contrôle de la liaison. Il représente le nombre de bits de données transmis par la couche application pendant un échange. Le débit théorique de couche physique est obtenu par l'équation (3.8) :

$$DR_1 = \frac{N_{\text{sd}} \cdot N_{\text{bpscs}} \cdot R \cdot N_{\text{ss}}}{t_{\text{dft}} + t_{\text{gi}}}, \quad (3.8)$$

où DR_1 est le débit de couche physique (en bits par seconde), N_{sd} le nombre de sous-porteuses, N_{bpscs} le nombre de bits codés par sous-porteuse et par flux, R le taux de codage convolutif et N_{ss} le nombre de flux spatiaux. t_{dft} est la durée d'un symbole OFDM et t_{gi} la durée de l'intervalle de garde. Un capteur IoT est un système simple, le plus souvent constitué d'une seule antenne qui ne lui permet pas de générer de multiples flux spatiaux. N_{ss} est donc égal à 1. N_{sd} dépend de la bande passante utilisée et N_{bpscs} du MCS. Les tableaux 3.4 et 3.5 présentent les valeurs de N_{sd} , R et N_{bpscs} . Dans les expérimentations, le débit mesuré est le débit utile. Sa valeur théorique est obtenue par l'équation (3.9) :

$$DR_4 = 2 \cdot \frac{\text{MSDU} - H_{\text{LLC}} - H_{\text{IP}} - H_{\text{UDP}}}{t_{\text{rtt}}}, \quad (3.9)$$

où MSDU, t_{rtt} , H_{LLC} , H_{IP} et H_{UDP} correspondent respectivement au MSDU (en bits), à la durée de l'échange (en secondes) et aux en-têtes de couche LLC, IPv4 et UDP. À noter que $H_{\text{LLC}} = 64$ bits, $H_{\text{IP}} = 160$ bits, $H_{\text{UDP}} = 64$ bits et t_{rtt} est obtenu à partir des équations (3.2) ou (3.3).

TABLEAU 3.4 – Schémas de modulation et de codage pour une bande passante de 1 MHz [107].

MCS	Mod.	R	N_{bpssc}	N_{cbps}	N_{dbps}	DR_1 (Mbits/s)*		Sensibilité* (dBm)
						$t_{\text{gi}}=8 \mu\text{s}$	$t_{\text{gi}}=4 \mu\text{s}$	
10	BPSK	1/4	1	24	6	0,150	0,167	-98
0	BPSK	1/2	1	24	12	0,300	0,333	-95
1	QPSK	1/2	2	48	24	0,600	0,667	-92
2	QPSK	3/4	2	48	36	0,900	1,000	-90
3	16-QAM	1/2	4	96	48	1,200	1,333	-87
4	16-QAM	3/4	4	96	72	1,800	2,000	-83
5	64-QAM	2/3	6	144	96	2,400	2,667	-79
6	64-QAM	3/4	6	144	108	2,700	3,000	-78
7	64-QAM	5/6	6	144	120	3,000	3,333	-77

* $N_{\text{ss}} = 1$ et $N_{\text{sd}} = 24$

TABLEAU 3.5 – Schémas de modulation et de codage pour une bande passante de 2 MHz [107].

MCS	Mod.	R	N_{bpssc}	N_{cbps}	N_{dbps}	DR_1 (Mbits/s)*		Sensibilité* (dBm)
						$t_{\text{gi}}=8 \mu\text{s}$	$t_{\text{gi}}=4 \mu\text{s}$	
0	BPSK	1/2	1	52	26	0,650	0,722	-92
1	QPSK	1/2	2	104	52	1,300	1,444	-89
2	QPSK	3/4	2	104	78	1,950	2,166	-87
3	16-QAM	1/2	4	208	104	2,600	2,888	-84
4	16-QAM	3/4	4	208	156	3,900	4,333	-80
5	64-QAM	2/3	6	312	208	5,200	5,777	-76
6	64-QAM	3/4	6	312	234	5,850	6,500	-75
7	64-QAM	5/6	6	312	260	6,500	7,222	-74

* $N_{\text{ss}} = 1$ et $N_{\text{sd}} = 52$

3.3.4 Définition du taux d'erreur de paquets (PER)

Dans une transmission radio, le taux de paquets erronés correspond au nombre de paquets qui n'ont pas été reçus à cause d'une erreur de transmission. Ce taux est directement lié à la qualité du canal. La référence [150] propose un modèle mathématique pour calculer le taux d'erreur de paquets d'une transmission radio utilisant la modulation OFDM. Le taux d'erreur est mesuré par la suite et comparé à ce modèle. Le BER (*Bit Error Rate*) d'une modulation OFDM est obtenu par l'équation (3.10) :

$$\text{BER} = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} \log_2(\sqrt{M})} \cdot \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\log_2(M)}{M - 1} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{2\sqrt{N_{\text{sd}}} - 1}{2\sqrt{N_{\text{sd}} - 1}}} \right), \quad (3.10)$$

où BER, M , $\text{erfc}(\cdot)$, $\frac{E_b}{N_0}$ et N_{sd} correspondent respectivement au taux d'erreur par bits transmis, à l'indice de modulation, à la fonction d'erreur complémentaire, au rapport signal/bruit et au nombre de sous-porteuses du signal OFDM. Le PER s'obtient en considérant la taille de la trame

de couche MAC, avec l'équation (3.11) :

$$p_{e,tr} = 1 - (1 - \text{BER})^{\frac{1}{R} \cdot 8 \cdot \text{MPDU}}, \quad (3.11)$$

où $p_{e,tr}$, R et MPDU sont respectivement le PER, le taux de codage convolutif et la taille de la trame de couche MAC. La valeur du MPDU dépend des expériences réalisées et la valeur de R est donnée dans les tableaux 3.4 et 3.5.

3.4 Mesure et analyse des performances du protocole 802.11ah

3.4.1 Matériel utilisé dans les expérimentations

Afin de réaliser les expériences et valider les modèles théoriques, un banc d'essai est construit autour d'une carte Raspberry Pi et d'un module de transmission Wi-Fi HaLow AHPI-7292 [151]. Le matériel utilisé par le banc de test est représenté sur la figure 3.6.

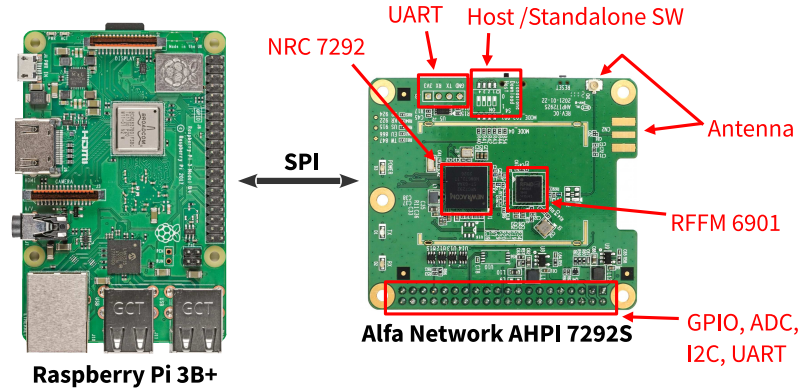


FIGURE 3.6 – Dispositif utilisé dans les expériences : carte Raspberry Pi 3B et module AHPI-7292S.

Le module Wi-Fi est constitué d'un circuit NRC-7292 de *Newracom* et d'un module frontal *Qorvo* RFFM-6901. Le circuit NRC-7292 assure les fonctionnalités des couches PHY et MAC du protocole 802.11ah. Il est composé de deux processeurs ARM Cortex-M0/M3, possède 64 ko de ROM, 752 ko de SRAM (*Static Random Access Memory*) et 32 ko de mémoire *cache*. Il intègre également un pré-amplificateur de puissance qui lui permet de fournir un signal de sortie à 0 dBm. Le circuit RFFM-6901 contient les éléments de tête d'un module de transmission radio fréquence. Il est utilisé pour filtrer et amplifier le signal, jusqu'à 15 dB en réception, et émettre jusqu'à 23 dBm [106, 152].

Le module AHPI-7292 peut fonctionner en mode autonome ou avec un système hôte connecté via une liaison SPI (*Serial Peripheral Interface*). Il peut jouer le rôle d'AP ou de STA. Il fonctionne dans différentes bandes de fréquences (US-915, EU-868, KR-922, JP-924 ou TW-847),

pour différentes largeurs de bande (1, 2 et 4 MHz) et différents MCS (0 à 7, et 10 pour une largeur de bande à 1 MHz). Le module AHPI-7292 peut également prendre en charge plusieurs mécanismes de sécurité (*open*, WPA2-PSK (*Pre Shared Key*), WPA3-OWE (*Opportunistic Wireless Encryption*) et WPA3-SAE (*Simultaneous Authentication of Equals*)) [106, 151, 152].

La société *Newracom* facilite l'évaluation et la mise en œuvre de cet EVK (*EValuation Kit*) en fournissant de nombreux outils de configuration et de test. La solution hôte intègre le logiciel de *Newracom* dans une carte Raspberry Pi 3B+, permettant l'utilisation d'outils réseau Linux courants, tels que *iw*, *iperf* et *ping*. Pour réaliser les expériences décrites dans la section suivante, deux modules AHPI-7292S et leur carte Raspberry Pi 3B+ sont montés et configurés, l'un en tant qu'AP et l'autre en tant que STA.

3.4.2 Configuration des expériences de mesures physiques

Les mesures sont réalisées en intérieur et en extérieur, sur le campus de Nantes Université à La Roche-sur-Yon. La figure 3.7 et le tableau 3.6 affiche et détaille la position de l'AP et des STA à l'extérieur. La figure 3.8 et le tableau 3.7 affiche et détaille les positions à l'intérieur.

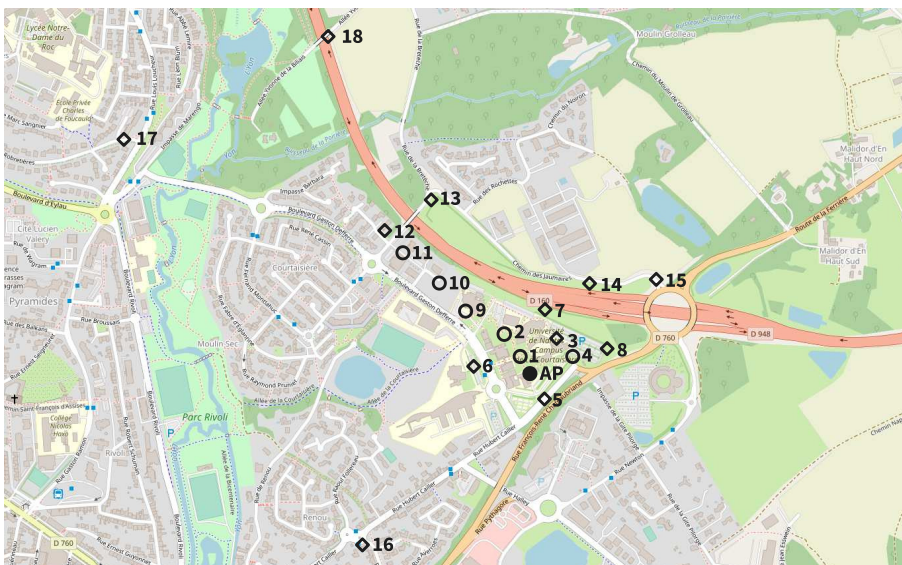


FIGURE 3.7 – Localisation des équipements dans l'environnement extérieur (Campus)

Pour les mesures en extérieur, l'AP est placé à environ 10 m du sol, sur le toit d'un bâtiment du campus. La station est positionnée dans un rayon de 1 km autour de l'AP, à dix-huit emplacements différents. Pour les mesures en intérieur, le point d'accès est placé à l'une des extrémités d'un bâtiment de recherche du campus, à environ deux mètres du sol. Ce bâtiment est composé de salles de laboratoire, équipées d'ordinateurs et de matériel pour les expériences de télécommunications et de réseaux. La station est positionnée à un mètre du sol, sur onze emplacements différents. Toutes les mesures sont effectuées au même étage.

TABLEAU 3.6 – Localisation des équipement dans l'environnement extérieur (Campus)

Position	Distance	Visibilité	Position	Distance	Visibilité
1	52 m	LoS ¹	10	320 m	LoS
2	116 m	LoS	11	440 m	LoS
3	95 m	NLoS ²	12	493 m	NLoS
4	102 m	LoS	13	515 m	NLoS
5	68 m	NLoS	14	258 m	NLoS
6	143 m	NLoS	15	380 m	NLoS
7	145 m	NLoS	16	626 m	NLoS
8	180 m	NLoS	17	1016 m	NLoS
9	235 m	LoS	18	970 m	NLoS

1 *Line of Sight* ou ligne de vue directe

2 *Non Line of Sight* ou ligne de vue indirecte

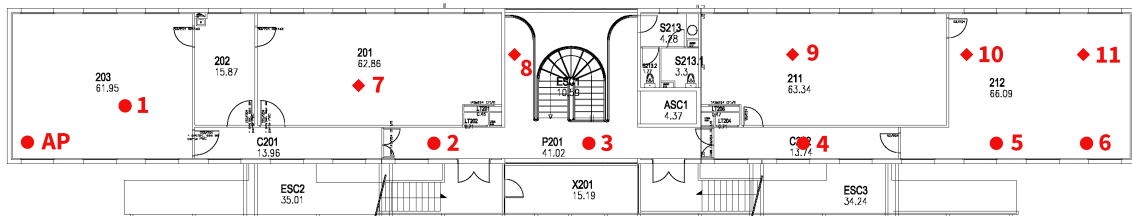


FIGURE 3.8 – Localisation des équipement dans l'environnement intérieur (Bâtiment D)

TABLEAU 3.7 – Localisation des équipement dans l'environnement intérieur (Bâtiment D)

Position	Distance	Visibilité	Position	Distance	Visibilité
1	4.50 m	LoS	7	14.00 m	NLoS
2	16.7 m	LoS	8	19.70 m	NLoS
3	22.15 m	LoS	9	31.30 m	NLoS
4	31.25 m	LoS	10	37.60 m	NLoS
5	37.80 m	LoS	11	42.00 m	NLoS
6	42.50 m	LoS			

Les mesures sont réalisées dans la bande de fréquence EU-868 en utilisant le canal 863,5 MHz pour une bande passante à 1 MHz et le canal 864 MHz pour une bande passante à 2 MHz. La liaison 802.11ah est qualifiée en faisant varier les puissances de transmission de 0 à 23 dBm, pour une largeur de bande à 1 et 2 MHz, un intervalle de garde court et long et un MCS configuré automatiquement en fonction de la distance entre les deux appareils. Les antennes de l'AP et de la station sont omnidirectionnelles. Le RSSI est mesuré en fonction du MCS et de la distance. Le débit de données de couche 4 et le temps d'aller-retour d'un échange sont mesurés en fonction du MCS. Le PER est mesuré en fonction du SNR. Ces mesures sont obtenues à l'aide des outils de mesure classiques, comme le montrent les figures 3.9 et 3.10. La taille des segments UDP est fixée à 445 octets pour une trame non agrégée et à 1378 octets pour une trame agrégée. Les

changements de MCS sont effectués automatiquement par l'équipement pour un PER égal ou supérieur à 10%.

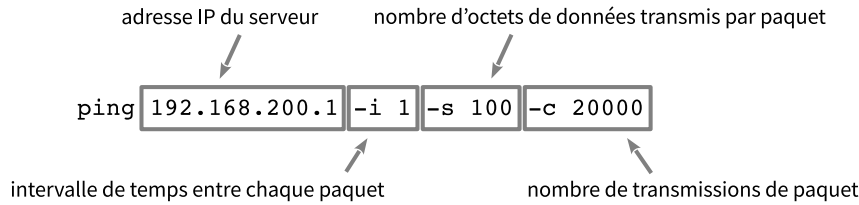


FIGURE 3.9 – Commande *ping* utilisée dans les expériences.

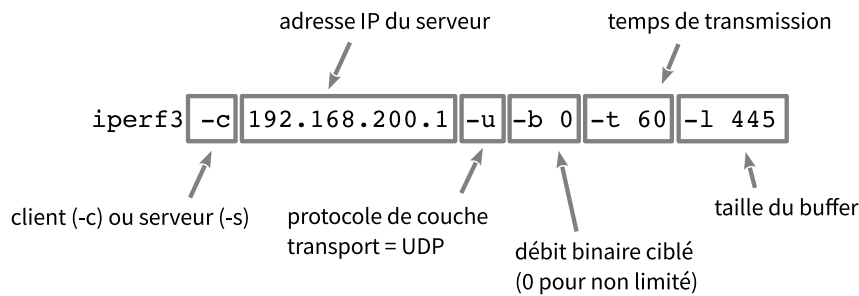


FIGURE 3.10 – Commande *iperf* utilisée dans les expériences.

3.4.3 Impact de la distance sur le RSSI

Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 représentent le RSSI mesuré pour les différents emplacements de la STA en extérieur. Les localisations sont indiquées sur la figure 3.7 et détaillées dans le tableau 3.6. Chaque point correspond à la moyenne de 7000 mesures réalisées pour chaque emplacement, comme le montre la figure 3.9. La puissance du signal de sortie de l'AP et de la STA (P_{ta}) est configurée à 23 dBm sur la figure 3.11, à 14 dBm sur la figure 3.12 et à 0 dBm sur la figure 3.13. 23 dBm correspond à la puissance maximale disponible à la sortie de la carte AHPI-7292S, 14 dBm à la puissance maximale autorisée dans la bande de fréquence EU-868 et 0 dBm à la puissance d'émission d'un capteur IoT en mode économie d'énergie (sans utilisation de l'amplificateur de puissance). La bande passante est configurée alternativement à 1 et 2 MHz.

Un modèle de propagation théorique est déterminé à partir de ces expériences, en ajustant toutes les mesures réalisées à l'aide d'une méthode polynomiale d'ordre 1 sous Matlab. Ce modèle est représenté en trait plein sur les figures 3.11, 3.12 et 3.13. Il est modélisé par l'équation (3.12) :

$$PL_{out} = 21,1 + 30,3 \cdot \log_{10}(d_{sta}), \quad (3.12)$$

où PL_{out} et d_{sta} sont le modèle de perte en extérieur et la distance entre l'AP et la STA. Le TGah fournit un modèle théorique médian, auquel il recommande d'ajouter une variable

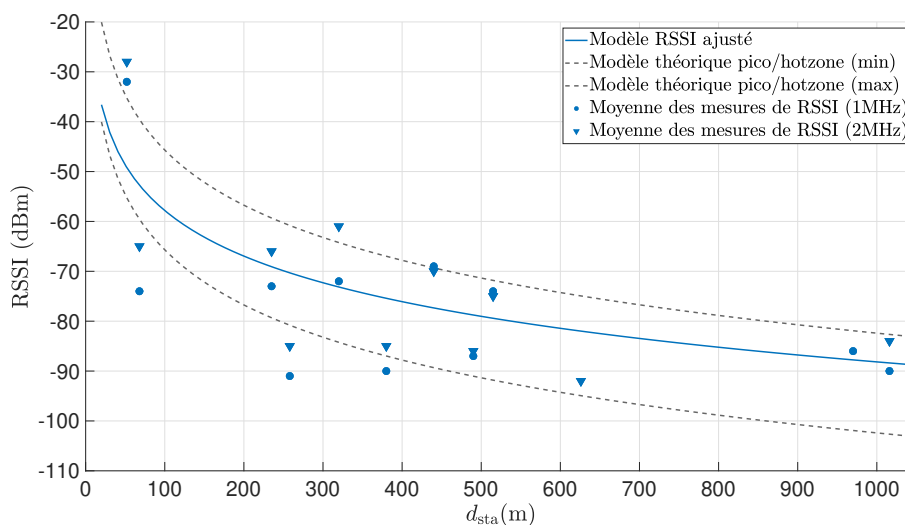


FIGURE 3.11 – Intensité du signal reçu (RSSI) mesurée en fonction de la distance dans un environnement extérieur ($P_{ta} = 23$ dBm).

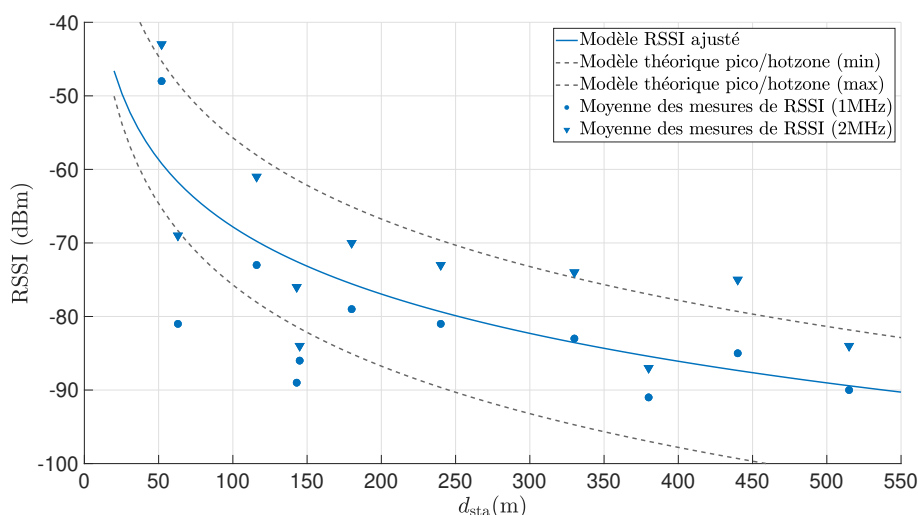


FIGURE 3.12 – Intensité du signal reçu (RSSI) mesurée en fonction de la distance dans un environnement extérieur ($P_{ta} = 14$ dBm).

aléatoire gaussienne pour modéliser les facteurs d'évanouissement [107]. Ce modèle est détaillé dans la partie 2.2.3. Il est représenté en pointillés sur les figures 3.11, 3.12 et 3.13. L'indice d'affaiblissement du modèle que nous proposons est égale à 3,03. Il est conforme à celui du modèle théorique qui est égale à 3,67 [107, 109, 112, 113]. Nous pouvons conclure que le modèle proposé est cohérent avec le modèle *pico/hotzone* du TGah [109, 112, 113, 127], mais il est lié à notre environnement de test, situé sur le campus de La Roche-sur-Yon, une petite ville de 55 000 habitants.

Il ressort de ces expériences que le RSSI est plus élevé pour une bande passante de 2 MHz.

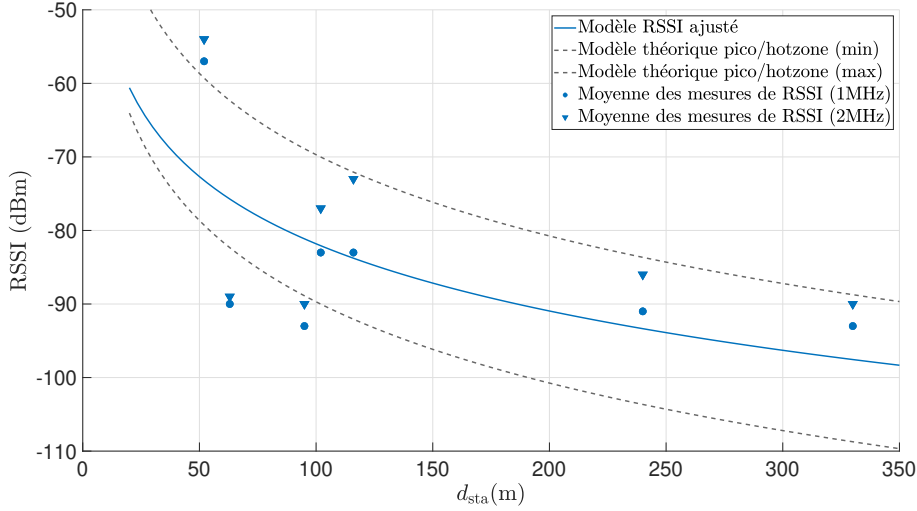


FIGURE 3.13 – Intensité du signal reçu (RSSI) mesurée en fonction de la distance dans un environnement extérieur ($P_{ta} = 0$ dBm).

La portée théorique est estimée à 1 km [109, 112, 113, 127] et les distances mesurées sont égales à 1016 m pour une puissance à 23 dBm, 550 m à 14 dBm et 330 m à 0 dBm. En combinant ces résultats avec les valeurs de sensibilité des tableaux 3.4 et 3.5, on peut observer que le MCS est égale à 7 jusqu'à une distance d'environ 400 m en vue dégagée et d'environ 200 m en vue obstruée. Cette distance diminue à 150 m pour une puissance de 14 dBm et à une centaine de mètres pour une puissance de 0 dBm. A ces distances, le MCS 7 est la combinaison de caractéristiques qui fournit le débit de données le plus élevé.

Pour économiser l'énergie consommée par une STA, il peut être souhaitable d'émettre avec une puissance de 0 dBm. La distance maximale atteinte avec cette puissance est largement suffisante pour fonctionner dans un environnement intérieur. Les emplacements de la station pour les mesures en intérieur sont indiqués sur la figure 3.8 et détaillés dans le tableau 3.7. Les résultats sont présentés sur la figure 3.14. La puissance de transmission est configurée à 0 dBm et la largeur de bande est fixée alternativement à 1 et 2 MHz. Les points représentent les mesures LoS effectuées pour les positions 1 à 6 et les triangles représentent les mesures NLoS effectuées pour les positions 7 à 11.

A partir de ces mesures, nous proposons deux modèles de propagation en intérieur. Ces modèles sont obtenus en ajustant toutes les mesures réalisées à l'aide d'une méthode polynomiale d'ordre 1 sous Matlab. Ils sont représentés en pointillés et en trait plein sur la figure 3.14, et sont modélisés par les équations (3.13) et (3.14) :

$$PL_{inLoS} = 24,3 + 27,4 \cdot \log_{10}(d_{sta}), \quad (3.13)$$

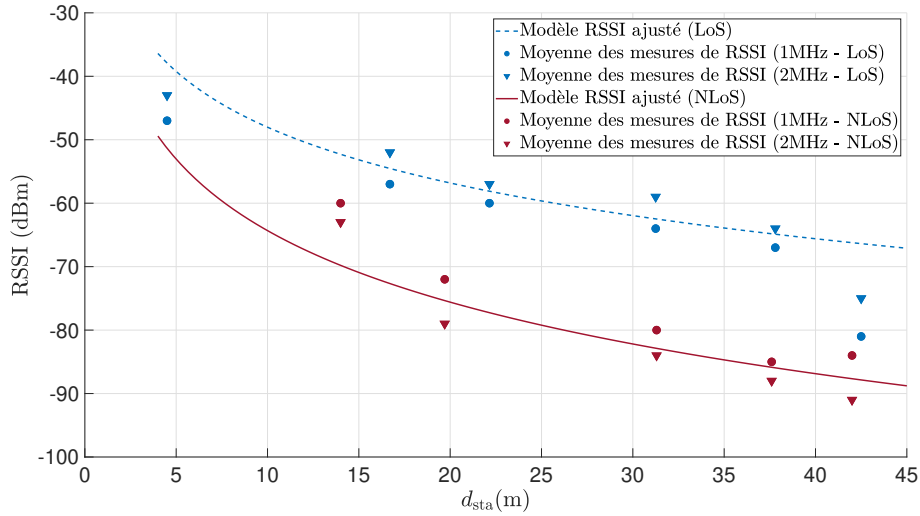


FIGURE 3.14 – Intensité du signal reçu (RSSI) mesurée en fonction de la distance dans un environnement intérieur ($P_{ta} = 0$ dBm).

$$PL_{inNLoS} = 26,9 + 37,4 \cdot \log_{10}(d_{sta}), \quad (3.14)$$

où PL_{inLoS} , PL_{inNLoS} correspondent respectivement au modèle de perte LoS et NLoS. d_{sta} est la distance entre l'AP et la STA. Ce modèle est conforme à celui fourni par le TGah pour les déploiements en intérieur [107, 109, 112, 113]. Pour le modèle NLoS, l'indice d'affaiblissement de propagation est équivalent à celui du modèle théorique, 3,74 pour le modèle proposé et 3,5 pour le modèle théorique décrit dans la partie 2.2.3. Pour le modèle LoS, l'ellipsoïde de Fresnel n'est pas respecté dans le couloir du bâtiment, ce qui explique le coefficient de 2,74 dans l'équation (3.13).

A distance équivalente, les RSSI mesurés en LoS sont supérieurs à ceux mesurés en NLoS. Dans le cas du LoS, les mesures réalisées à 2 MHz sont toujours supérieures à celles effectuées à 1 MHz. Dans le cas du NLoS, elles sont toujours inférieures. On peut en conclure que les signaux à 1 MHz se propagent mieux dans les environnements obstrués et que les signaux à 2 MHz se propagent mieux dans les environnements dégagés. Sur la figure 3.14, le RSSI mesuré est toujours supérieur à -80 dBm pour les mesures LoS et à -90 dBm pour les mesures NLoS. Avec ces valeurs, une station utilise un MCS minimum égal à 4 et à 1, respectivement.

3.4.4 Impact du RSSI sur le MCS

Les figures 3.15 et 3.16 représentent le MCS utilisé par une station en fonction du RSSI pour l'environnement extérieur. Les figures 3.17 et 3.18 représentent le MCS utilisé par une STA en fonction du RSSI pour l'environnement intérieur. Sur ces figures, le modèle théorique

est représenté en pointillés et correspond à la sensibilité minimale indiquée par la norme et contenue dans les tableaux 3.4 et 3.5 [86, 87, 107, 108]. La puissance de transmission de l'AP et de la STA (P_{ta}) est fixée alternativement à 0, 14 et 23 dBm. La largeur de bande est égale à 1 MHz sur les figures 3.15 et 3.17 et 2 MHz sur les figures 3.16 et 3.18.

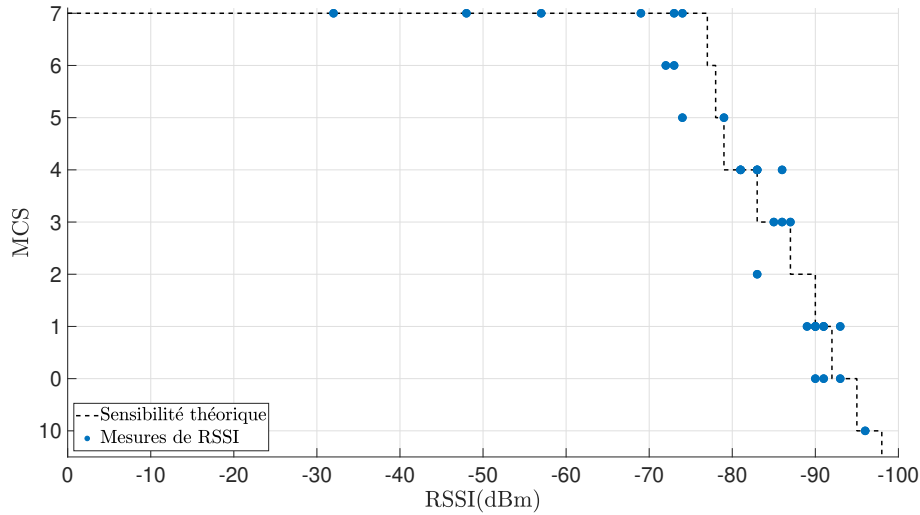


FIGURE 3.15 – Schéma de modulation et de codage (MCS) sélectionné par l'équipement en fonction du RSSI dans un environnement extérieur (BW = 1 MHz).

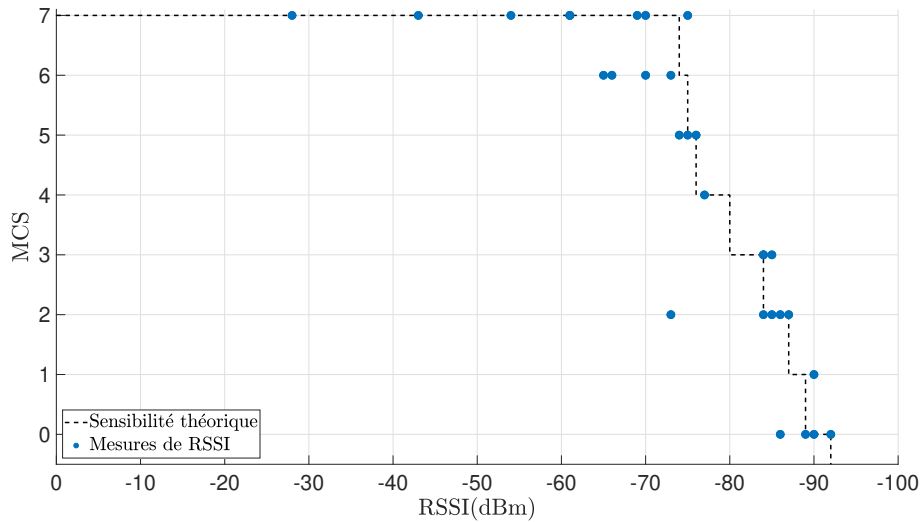


FIGURE 3.16 – Schéma de modulation et de codage (MCS) sélectionné par l'équipement en fonction du RSSI dans un environnement extérieur (BW = 2 MHz).

Les valeurs mesurées sont en adéquation avec les transitions théoriques du MCS [86, 87, 107, 108]. Les points de mesure en extérieur sont très proches de la théorie pour les deux largeurs de bande considérées. Dans le cas de l'environnement intérieur, l'écart est plus important pour

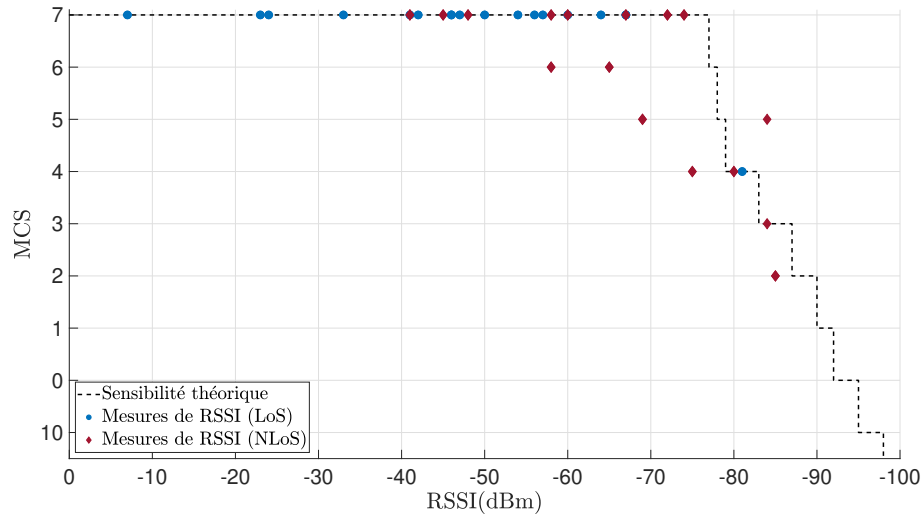


FIGURE 3.17 – Schéma de modulation et de codage (MCS) sélectionné par l'équipement en fonction du RSSI dans un environnement intérieur (BW = 1 MHz).

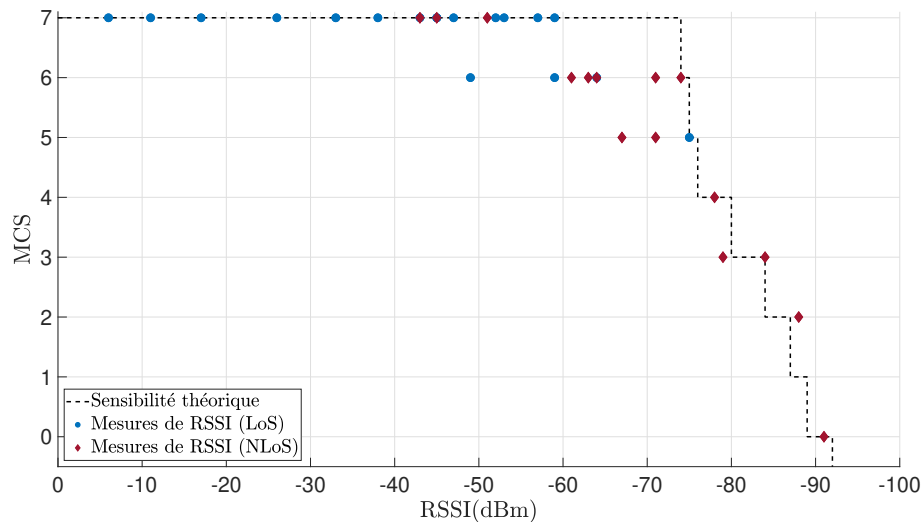


FIGURE 3.18 – Schéma de modulation et de codage (MCS) sélectionné par l'équipement en fonction du RSSI dans un environnement intérieur (BW = 2 MHz).

le NLoS que pour le LoS. Les écarts entre chaque MCS sont très faibles, de l'ordre de 1 dB, et chaque changement correspond à un niveau de RSSI mais aussi à un SNR. Les mesures NLoS sont automatiquement effectuées avec un MCS plus faible en raison de ce SNR qui est plus faible. Les niveaux de sensibilité minimale d'un signal à 2 MHz de bande passante sont théoriquement supérieurs de 3 dB à ceux d'un signal à 1 MHz de bande passante. L'analyse de ces résultats avec les précédents permet de confirmer que le MCS 7 est utilisé à des distances allant jusqu'à 400 m pour une puissance de 23 dBm et jusqu'à 150 m pour une puissance de 14 dBm. A ces distances, il est donc possible d'avoir un débit de données d'environ 3 Mbit/s pour une largeur

de bande à 1 MHz et 6 Mbit/s pour une largeur de bande à 2 MHz.

3.4.5 Impact du MCS sur le débit de données

Les figures 3.19, 3.20, 3.21 et 3.22 représentent l'évolution du débit de données obtenu par une station en fonction du MCS pour un intervalle de garde court et un intervalle de garde long. La bande passante est fixée à 1 MHz sur les figures 3.19 et 3.21, et 2 MHz sur les figures 3.20 et 3.22. Chaque figure est composée de quatre courbes représentant le transfert de données sans accusé de réception, avec un accusé de type NDP-ACK, avec le mécanisme RTS/CTS et l'accusé NDP-ACK, et enfin le transfert d'une trame de données agrégée avec le mécanisme RTS/CTS et l'accusé NDP-ACK. Les débits de données théoriques de la couche PHY et de la couche transport sont représentés en pointillés. Ils sont déterminés à partir des équations (3.8) et (3.9).

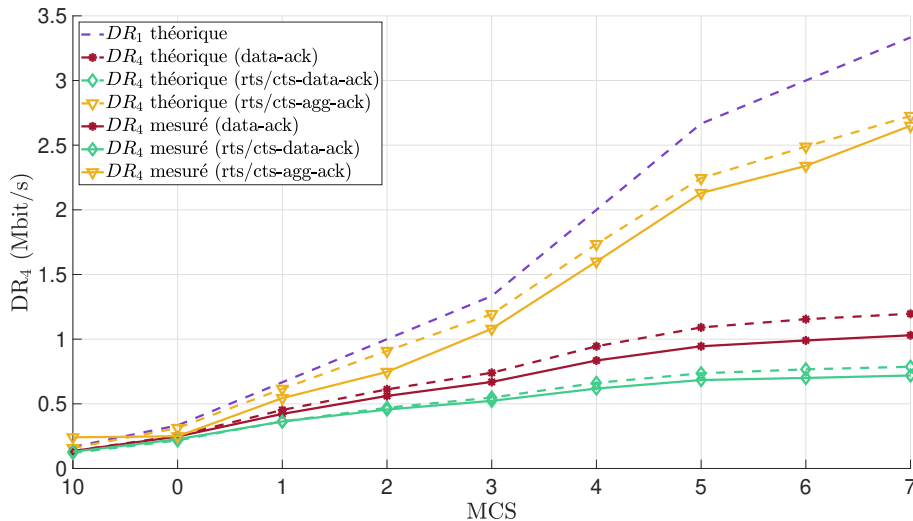


FIGURE 3.19 – Débit de données mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde court ($BW = 1$ MHz).

Les courbes expérimentales DR_4 sont très proches des courbes théoriques, mais toujours en dessous. La différence est d'environ 3% pour les trames agrégées et de 10 à 15% pour les autres. Le débit mesuré avec le MCS 7 et sans agrégation est inférieur à la moitié du débit théorique de la couche physique. Cette différence est due aux mesures qui sont effectuées au niveau de la couche 4, avec des temps d'attente pour l'accès au média et l'insertion des en-têtes de couches IPv4, LLC et MAC. En outre, l'utilisation d'un ACK et d'un mécanisme d'accès au média réduit encore le débit de données, en partie à cause de la trame RTS qui est transmise avec le MCS le plus faible. Le seul moyen d'augmenter le débit utile est d'utiliser le mécanisme d'agrégation. Le rapport entre le débit théorique de la couche PHY et le débit des trames agrégées est d'environ 1,25. Un MPDU peut contenir jusqu'à 511 octets et un A-MPDU jusqu'à 511 symboles. Pour

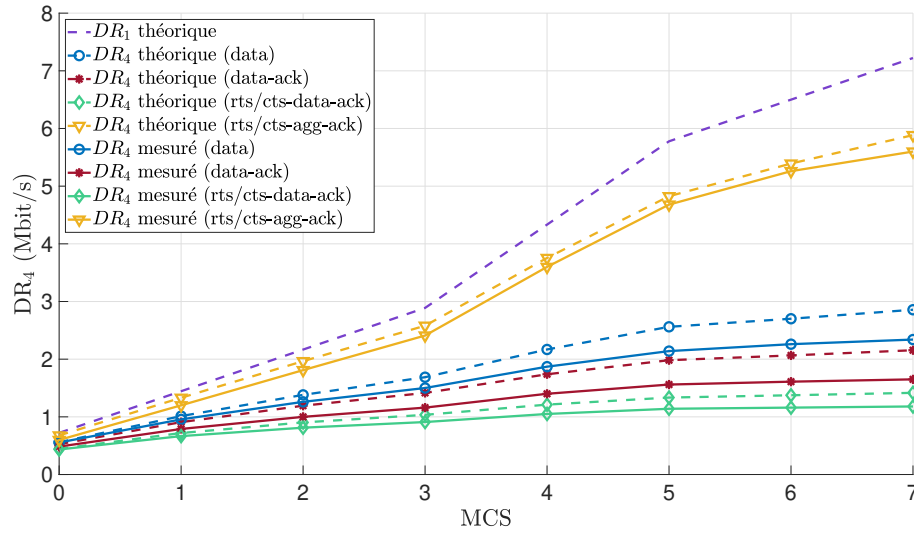


FIGURE 3.20 – Débit de données mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde court (BW = 2 MHz).

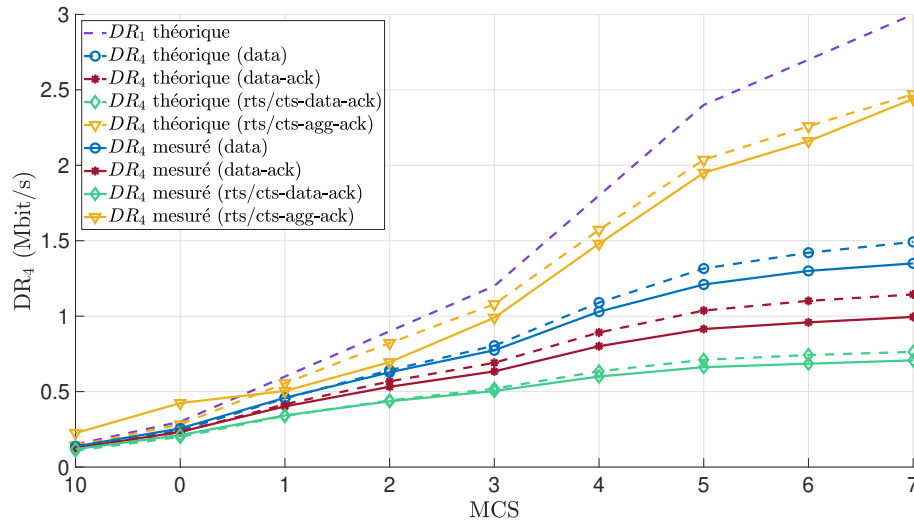


FIGURE 3.21 – Débit de données mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde long (BW = 1 MHz).

une trame agrégée, il n’y a qu’un seul en-tête MAC, un seul ACK et une seule tentative d’accès au média, ce qui explique que le débit d’une trame agrégée est 3 à 4 fois plus élevé qu’une trame transmise sans agrégation. Les mesures effectuées avec un intervalle de garde long montrent que le débit est en moyenne 10% plus faible qu’avec un intervalle de garde court.

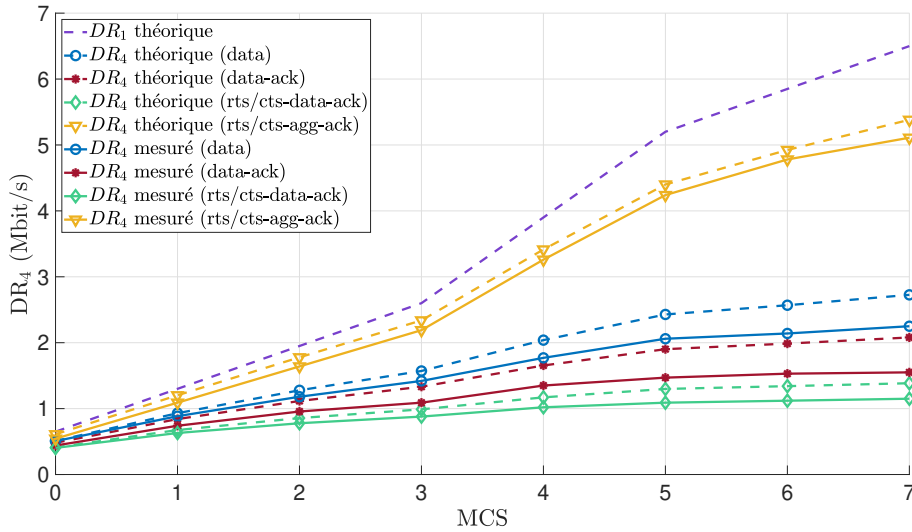


FIGURE 3.22 – Débit de données mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde long (BW = 2 MHz).

3.4.6 Impact du MCS sur la durée d'un échange (Round Trip Time)

Les figures 3.23, 3.24, 3.25 et 3.26 représentent l'évolution du RTT en fonction du MCS pour un intervalle de garde court et un intervalle de garde long. La bande passante est fixée à 1 MHz sur les figures 3.23 et 3.25, et 2 MHz sur les figures 3.24 et 3.26. Chaque figure est composée de trois courbes représentant le transfert de données sans accusé de réception, avec un accusé NDP-ACK et avec le mécanisme RTS/CTS. Le RTT théorique est tracé en pointillés, à partir des équations (3.2) et (3.3).

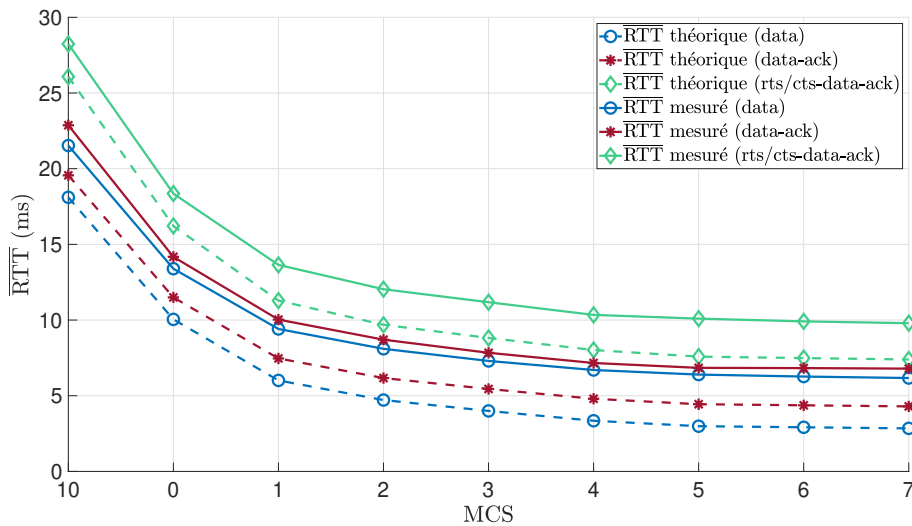


FIGURE 3.23 – Temps d'échange moyen (RTT) mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde court (BW = 1 MHz).

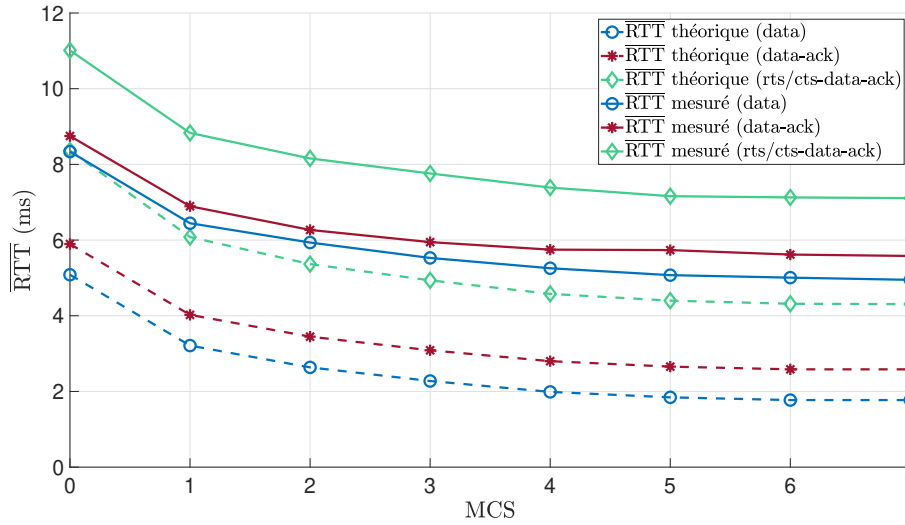


FIGURE 3.24 – Temps d’échange moyen (RTT) mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde court (BW = 2 MHz).

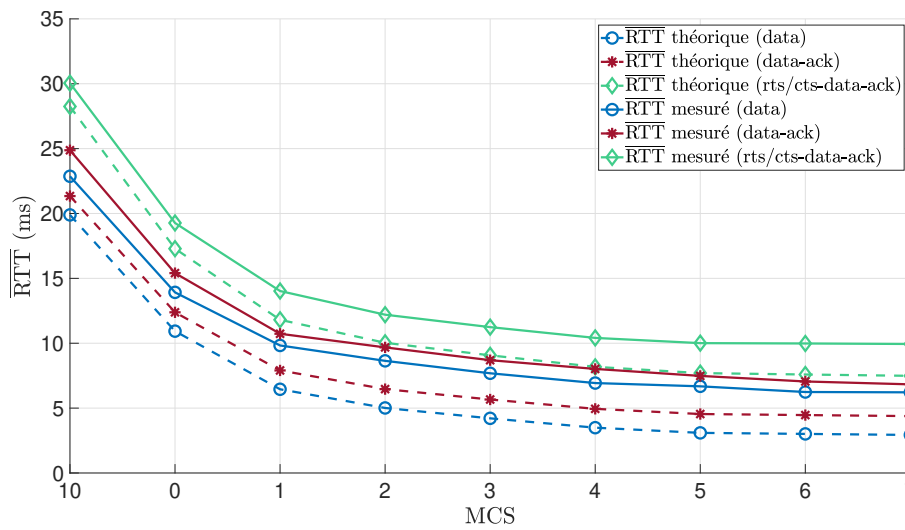


FIGURE 3.25 – Temps d’échange moyen (RTT) mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde long (BW = 1 MHz).

Sur ces figures, les valeurs mesurées sont très proches des valeurs théoriques, mais toujours légèrement supérieures de 2 à 4 ms. En pratique, les courbes correspondent à la moyenne de 7 000 mesures de RTT qui tiennent compte du *jitter* et des échecs de transmission. En outre, le temps de traitement de l’équipement n’est pas pris en compte dans la théorie. Pour une largeur de bande de 2 MHz, le RTT est toujours inférieur à 12 ms et en dessous de 10 ms pour les MCS 3 à 7. Pour une largeur de bande de 1 MHz, le RTT est toujours inférieur à 30 ms, 15 ms pour les MCS 1 à 7 et 10 ms pour les MCS 6 et 7. L’utilisation du RTS/CTS augmente le RTT de 2 ms

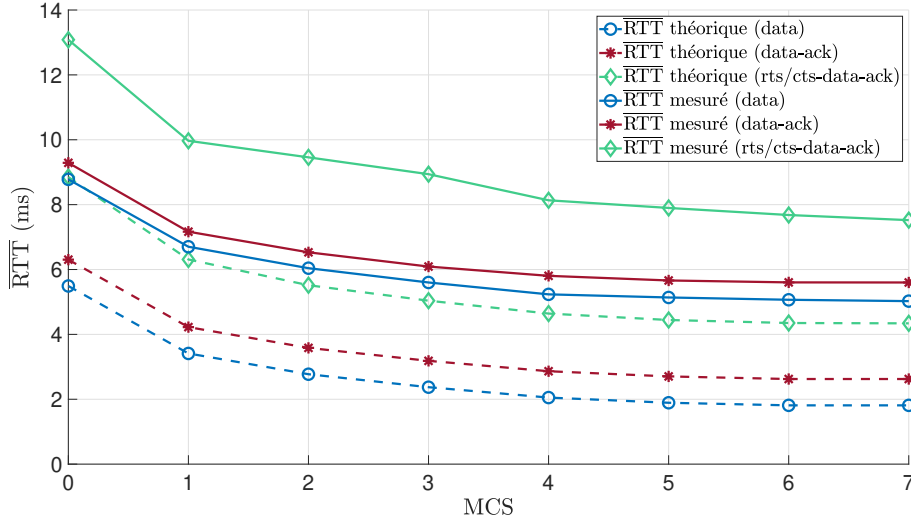


FIGURE 3.26 – Temps d’échange moyen (RTT) mesuré en fonction du MCS pour un intervalle de garde long (BW = 2 MHz).

pour une largeur de bande de 2 MHz et de 3 ms pour les MCS 0 à 7 et une largeur de bande de 1 MHz, et 6 ms pour le MCS 10. Les mesures effectuées pour un intervalle de garde long sont supérieures de 10% en moyenne à celles réalisées pour un intervalle de garde court.

3.4.7 Impact du SNR sur le taux d’erreur de paquets

La figure 3.27 représente le PER en fonction du SNR pour différents MCS et une bande passante de 1 MHz. Les courbes théoriques sont tracées en trait plein à partir des équations (3.10) et (3.11) et une charge de 445 octets. Les courbes de mesures sont tracées en pointillés, et obtenues avec l’outil *iperf*. La valeur du SNR est obtenue à l’aide de l’équation (3.15) :

$$\text{SNR} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{N_{sd}}{N_{sc}} \cdot \frac{t_{dft}}{t_{dft} + t_{gi}} \cdot N_{ss} \cdot R \cdot \log_2(M), \quad (3.15)$$

Les mesures correspondent à la modélisation théorique, avec une différence de quelques décibels. Ces mesures sont réalisées aux emplacements indiqués sur les figures 3.7 et 3.8, pour les MCS 10, 4 et 7, en faisant varier le niveau de bruit à l’entrée du module frontal RFFM-6901 à l’aide d’une carte HackRF One. Le RSSI et le SNR sont mesurés au niveau du NRC-7292, ils sont donc amplifiés par le module FEM (*Front End Module*) qui va également ajouter son propre bruit en fonction du facteur d’amplification. Le PER augmente lorsque le SNR diminue. La plupart des algorithmes d’adaptation du débit supervise le PER pour ajuster le MCS et obtenir le meilleur débit de transmission. La mesure du PER doit donc se faire sur une période longue en comparaison de la durée de transmission d’un paquet, ce qui peut potentiellement expliquer la différence entre les mesures et le modèle théorique. Cette modélisation théorique du PER (équa-

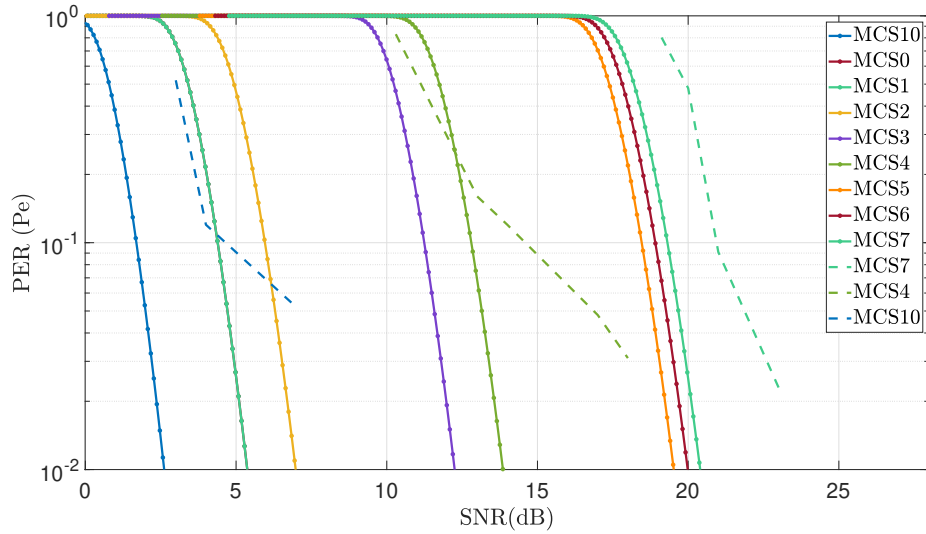


FIGURE 3.27 – Taux d’erreur de paquets (PER) mesuré en fonction du SNR pour un intervalle de garde long ($BW = 1$ MHz).

tions (3.10) et (3.11)) est utilisée dans le chapitre suivant pour modéliser le fonctionnement et la consommation énergétique d’une station 802.11ah.

3.5 Discussions et conclusion

Les expériences ont été réalisées avec un matériel qui peut être utilisé en laboratoire ou mis en œuvre en tant que dispositif IoT. Les résultats permettent de valider les caractéristiques théoriques de la norme 802.11ah. Les modèles de propagation issus des mesures sont conformes à ceux du TGah et les valeurs mesurées sont très proches des valeurs théoriques. Il convient de noter que ces mesures sont effectuées sans utiliser le mécanisme de fragmentation ni la topologie maillée, ce qui aurait pour effet d’augmenter le RTT et de diminuer le débit de données.

La pertinence de la technologie 802.11ah dans les applications IoT peut être discutée à partir de ces résultats. En extérieur et avec une puissance de 23 dBm, le MCS est égal à 7 pour une distance allant jusqu’à 400 m. Cette distance est d’environ 150 m avec une puissance de 14 dBm. Avec un MCS de 7 et une largeur de bande de 1 MHz, il est possible d’obtenir des débits de données allant jusqu’à 2,65 Mbit/s pour un transfert de trames agrégées et une latence inférieure à 10 ms. Pour une largeur de bande de 2 MHz, les débits de données atteignent 5,6 Mbit/s et la latence est inférieure à 8 ms. Le MCS est égal à 0 pour une distance allant jusqu’à 1 km et une puissance de 23 dBm, environ 500 m pour une puissance de 14 dBm. Avec un MCS de 0 et une largeur de bande de 1 MHz, le débit est de 0,249 Mbit/s et le RTT inférieur à 20 ms. Pour une largeur de bande de 2 MHz, le débit peut atteindre 0,599 Mbit/s et le RTT

11,239 ms. D’après ces résultats, le 802.11ah peut être utilisé dans de nombreuses applications IoT. Certaines sont référencées dans les articles [98, 101, 117, 153]. Cependant, la plupart des stations IoT ont une faible puissance de transmission. C’est particulièrement le cas pour les capteurs qui sont dispersés sur de vastes zones géographiques, qui disposent d’une petite quantité de données et qui doivent optimiser leur consommation d’énergie. Avec une puissance de 0 dBm, la portée maximale est de 330 m, très inférieure à la portée des autres technologies LPWAN [98]. L’acquisition de données dans la *Smart City* ou les *Smart Grid* sont des applications qui nécessitent des messages périodiques avec une faible quantité de données. Le protocole 802.11ah pourrait convenir à ce type d’applications, mais avec une portée plus faible. De ce point de vue, il serait plus logique de considérer cette technologie comme une liaison de retour *Backhaul* pour des périphériques collecteurs de données d’un réseau LoRa.

A contrario, les valeurs de débit et de latence sont bien meilleures que celles des autres technologies LPWAN [98, 153]. Le RTT est suffisant pour le développement d’applications critiques [117] et les débits pour le transfert de données audio/vidéo [101]. La norme 802.11ah offre des débits de données plus élevés qui répondent aux exigences des applications multimédias. Les débits de données recommandés pour les caméras de surveillance IP vont de 130 kbit/s avec un encodage MJPEG (*Motion Joint Photographic Experts Group*) de faible qualité à 4 Mbit/s pour un encodage MPEG-4/H.264 (*Moving Picture Experts Group*) de haute qualité. D’autre part, les valeurs de RTT répondent aux exigences de toutes les classes de catégorisation des systèmes industriels, y compris les classes de contrôle 1 et 2, où la latence doit être inférieure à 10 ms, et les classes de surveillance 4 et 5, où la latence doit être inférieure à 1000 ms [117, 153]. Concrètement, la technologie Wi-Fi HaLow peut couvrir un large spectre d’applications, parmi lesquelles le transfert de données entre machines autonomes (drones, robots industriels, etc), la vidéosurveillance, l’acquisition de données ou le transfert d’images médicales [154].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené des expériences sur les performances du protocole Wi-Fi HaLow dans des environnements intérieur et extérieur. Ce travail répond à un besoin exprimé dans de nombreux articles [86, 87, 117]. Nous avons comparés des modèles théoriques simples à des expériences pratiques. Les campagnes de mesure montrent le bon comportement du Wi-Fi HaLow en termes de portée (jusqu’à 1 km pour 23 dBm), de débit (près de 6 Mbit/s pour une largeur de bande de 2 MHz) et de RTT. Les mesures nous ont également permis de proposer les premiers modèles de propagation et de valider l’utilisation de cette technologie dans différents domaines de l’IoT. La caractérisation de ces métriques nous permet dans le chapitre suivant, de proposer un modèle de consommation énergétique qui prend en compte l’environnement d’une STA 802.11ah.

MESURE ET MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DU PROTOCOLE 802.11AH

Introduction

L'efficacité énergétique est une problématique majeure de l'IoT. En effet, ce type de réseau est constitué d'objets généralement alimentés par des sources peu fiables en énergie. De plus, le nombre de dispositifs présents dans le réseau affecte directement la disponibilité du média, et donc la consommation d'énergie de chaque équipement. La norme 802.11ah intègre nativement des mécanismes de gestion et d'optimisation de la consommation énergétique pour un nombre important de dispositifs. Le fonctionnement de ces mécanismes a été largement étudié et simulé dans la littérature scientifique, mais peu d'évaluations pratiques ont été proposées en raison du manque d'équipements sur le marché. Dans ce chapitre, nous réalisons une évaluation complète de la consommation énergétique d'une station 802.11ah. Cette évaluation, basée sur des mesures, nous permet ainsi d'établir un modèle théorique de consommation d'énergie qui tient compte de l'environnement de la station et des différentes couches de communication.

Le chapitre est organisé de la manière suivante. Un état de l'art est proposé dans la partie 4.1. Dans la partie 4.2, des mesures de consommation d'énergie sont présentées et évaluées pour différents modes de fonctionnement. Elles sont analysées dans la partie 4.3 et permettent dans la partie 4.4 d'établir un modèle théorique de consommation d'énergie qui sera affiné par une analyse du comportement de la station et la simulation de son environnement. Des discussions et une conclusion sont proposées dans la partie 4.5.

4.1 État de l'art

Dans la littérature, de nombreux travaux donnent un aperçu des caractéristiques et des mécanismes du protocole 802.11ah [103, 104, 114, 125, 126]. Cette description est complétée par une justification de son utilisation dans l'article [101] et par une synthèse des principaux défis

et axes de recherche dans les articles [86, 87, 102].

L'efficacité énergétique a largement été abordée par la communauté scientifique, mais uniquement par des modélisations et des simulations [155-158]. Les références [122, 123] proposent un modèle théorique qui permet d'évaluer la consommation d'énergie et le nombre maximum de stations en fonctionnement. Dans l'article [159], un modèle de prédiction des périodes de service est présenté, afin de réduire les temps d'accès au média et minimiser la consommation d'énergie. Un modèle analytique est également proposé dans l'article [160] afin de déterminer les caractéristiques de transmission les plus appropriées. Dans l'article [161], les auteurs proposent un modèle stochastique qui estime la durée de vie d'un équipement 802.11ah. Enfin, la référence [162] utilise un modèle mathématique de consommation d'énergie pour valider un mécanisme de réservation d'accès au média.

D'autres travaux portent sur les mécanismes qui permettraient d'améliorer cette efficacité énergétique. Les articles [134, 135, 163] évaluent l'énergie consommée par une station utilisant le TWT. Le mécanisme TIM est étudié dans les articles [105, 164]. Le premier introduit un algorithme de *clustering* et le second étudie l'impact de ce mécanisme sur un réseau au trafic saturé. Les références [118, 165-167] proposent d'ajuster le nombre et la taille des fenêtres RAW afin d'améliorer l'efficacité énergétique. Le mécanisme RAW est également étudié dans l'article [168], pour un réseau avec un grand nombre de stations. L'article [169] propose une amélioration du mécanisme DCF et l'article [170] étudie un nouvel algorithme de contention. Enfin, une coopération des mécanismes TIM et RAW est proposée dans l'article [119]. Tous ces travaux s'appuient sur des simulations pour valider les modèles. Cependant, ils négligent généralement les temps de démarrage et d'initialisation des équipements.

À notre connaissance, une seule étude propose des mesures de consommation énergétique réalisées sur un système réel. L'article [106] valide la technologie Wi-Fi HaLow en tant que solution IoT. Cependant, cette étude se concentre sur la mesure du courant consommé par le SoC 802.11ah (*System on Chip*) pendant les phases de transmission et de réception. Elle ne considère pas l'évolution de la puissance consommée par les différents éléments d'une station pendant une phase de réveil et ne considère pas l'environnement de la station, notamment le nombre d'équipements dans le réseau, qui affecte directement la consommation d'énergie.

4.2 Mesure de l'énergie consommée par une station 802.11ah

4.2.1 Définition de l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est définie comme la quantité moyenne d'énergie consommée par un équipement pour envoyer un bit d'information. On l'obtient en divisant l'énergie moyenne consommée par l'équipement par la quantité de données transmises. L'efficacité énergétique peut donc être améliorée en réduisant le courant consommé par une station, en augmentant

la quantité d'informations transportée par trame ou en diminuant la durée de transmission de chaque trame. Une station qui consomme beaucoup de puissance en transmission peut utiliser un plus grand MCS et donc obtenir un débit de données plus important, ce qui diminue d'autant l'énergie consommée durant la phase de transmission. Pour être précis, un modèle théorique doit prendre en compte l'environnement de la station, les conditions de transmission, mais également les temps de réveil et la puissance consommée par l'ensemble des circuits de l'objet connecté, c'est ce que nous proposons d'évaluer dans ce chapitre.

4.2.2 Banc de test mis en œuvre dans les expériences

Les expériences présentées dans ce chapitre sont réalisées à l'aide d'un banc de test représenté sur la figure 4.1. Il se compose d'un AP, d'une station 802.11ah et d'un serveur lwM2M.

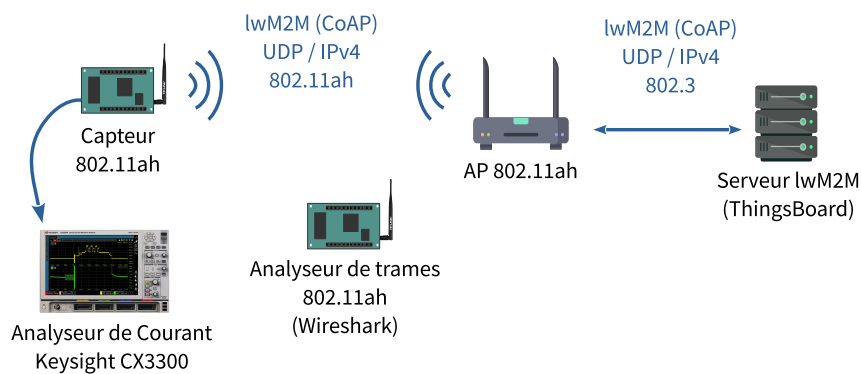


FIGURE 4.1 – Banc d'essai expérimental utilisé pour mesurer les courants consommés par un capteur 802.11ah.

L'AP est constitué d'une carte Raspberry Pi 3B+ et d'un module APhi-7292 d'Alfa Network [151]. La STA est une carte d'évaluation et de test, distribuée par la société Silex Technology [171]. La carte d'évaluation et le module APhi-7292 sont construits autour d'une puce Newracom NRC-7292 et d'un module frontal RFFM-6901. Ce sont les mêmes équipements que ceux utilisés dans la partie 3.4. La puce NRC-7292 contient un SoC Wi-Fi 802.11ah, deux processeurs Cortex M0 et M3, 32 ko de mémoire *cache*, de la mémoire *flash*, et toutes les interfaces nécessaires au développement d'un objet connecté [152]. Le serveur est directement relié au point d'accès et fournit un service lwM2M basé sur une solution *ThingsBoard* [172].

L'AP diffuse son SSID sur le canal à 863,5 MHz, avec une bande passante de 1 MHz. Le seuil de déclenchement du mécanisme RTS/CTS est configuré dans le fichier *hostapd.conf* de l'AP, selon les besoins de l'expérience. Les trames balise sont transmises toutes les 2 s. La station est placée en sommeil profond et se réveille périodiquement pour réaliser des mesures physiques à partir d'un circuit BME-680 et envoyer les valeurs au serveur *ThingsBoard*. Les données sont codées en JSON (*JavaScript Object Notation*) et encapsulées dans un paquet CoAP/UDP/IPv4.

Newracom fournit une solution complète pour développer des programmes de test [148]. Cette solution est un EVK, tous les mécanismes proposés par le TGah ne sont donc pas mis en œuvre. Les mécanismes DCF et EDCA sont implémentés, alors que le RAW et le TWT ne le sont pas. Les mécanismes TIM, AID, NDP sont en partie déployés, mais pas les en-têtes PV1 pour des raisons de sécurité. Une autre carte Raspberry Pi 3B+ équipée d'un module APhi-7292 complète ce banc de test. Elle est utilisée pour espionner la liaison Wi-Fi HaLow, en effectuant une capture des échanges entre la STA, l'AP et le serveur à l'aide du logiciel *wireshark*. Le courant consommé par la STA est mesuré à l'aide d'un analyseur de courant Keysight CX-3300.

4.2.3 Analyse des trames échangées entre la station et l'AP

Le modèle de consommation d'énergie proposé par la suite, est basé sur l'observation du fonctionnement d'un capteur 802.11ah. La figure 4.2 représente une phase de transmission de données capturées par l'analyseur de trames avec le logiciel *wireshark*.

Time	Source	Destination	Protocol	Info
0.000...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R...C, SSID="halow_demo"
0.099...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
0.201...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
0.304...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
0.407...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
0.476...	20:12:52:92:...	silextec_ab:...	802.11	QoS Null function (No data), SN=10, FN=0, Flags=..
0.476...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.484...	silextec_ab:...	20:12:52:92:...	ARP	Who has 192.168.1.13? Tell 192.168.1.1
0.485...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.490...	20:12:52:92:...	silextec_ab:...	ARP	192.168.1.13 is at 20:12:52:92:d2:12
0.491...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.508...	192.168.1.13	172.17.111.2	CoAP	CON, MID:18128, POST, /api/v1/tBERmZns8Te0WB0epBoD.
0.509...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.594...	172.17.111.2	192.168.1.13	CoAP	ACK, MID:18128, 2.01 Created
0.595...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.729...	20:12:52:92:...	silextec_ab:...	802.11	QoS Null function (No data), SN=11, FN=0, Flags=..
0.729...			WLAN	Radiotap Capture v0, Length 23, S1G ACK 1MHz
0.781...	silextec_ab:...		802.11	S1G Beacon, Flags=...R.FTC

FIGURE 4.2 – Échange de données entre une station 802.11ah et l'AP lors d'une phase de réveil.

La station commence par envoyer une trame QoS *null data* pour annoncer son réveil. Il s'ensuit un échange de trames ARP (*Address Resolution Protocol*), qui permet à la STA de mettre à jour et de vérifier la correspondance des adresses IP/MAC du réseau. La trame contenant les données CoAP est ensuite transmise par la STA au serveur. La STA termine cet échange par la transmission d'une trame QoS *null data* pour annoncer sa mise en sommeil profond. Toutes les trames échangées sont acquittées au niveau de la couche MAC par une trame NDP-ACK.

4.2.4 Mesure du courant consommé par une station non-TIM

Dans cette expérience, le courant consommé par la puce NRC-7292 et l'amplificateur RFFM-6901 est mesuré pour un mode de fonctionnement non-TIM. La puissance d'émission est fixée à 0 dBm, la bande passante à 1 MHz et le MCS à 7. La station se réveille toutes les 10 s pour transmettre 165 octets de données CoAP au serveur lwM2M (44 octets d'en-tête CoAP +

121 octets de données au format JSON). La figure 4.3 représente le courant consommé par la station lors de deux phases de réveil consécutives.

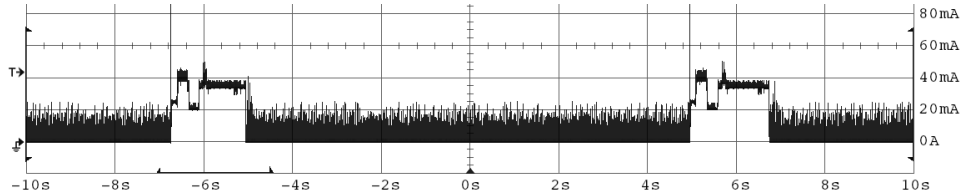


FIGURE 4.3 – Courant consommé par une station non-TIM lors de différentes phases de réveil.

La STA est réveillée toutes les 10 s pour une durée moyenne de 1,7 s. L'évolution du courant consommé par la puce NRC-7292 et l'amplificateur lors d'une des phases de réveil est représenté sur la figure 4.4 et les valeurs sont détaillées dans le tableau 4.1. En phase de sommeil profond, le courant consommé par la puce NRC-7292 (I_{sleep}) est mesuré à 18,13 μA .

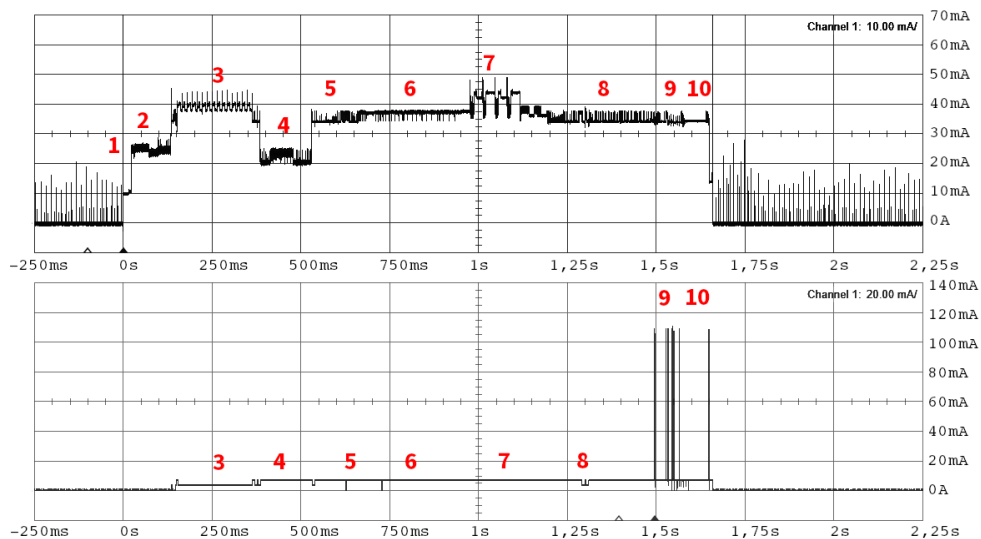


FIGURE 4.4 – Courant consommé par le circuit NRC-7292 et l'amplificateur RFFM-6901 lors d'une phase de réveil.

A chaque réveil, la station effectue les opérations suivantes, notées (1) à (8) sur la figure 4.4 : initialisation du système, des Entrées/Sorties et des couches PHY et MAC, vérification FOTA (*Firmware Over The Air*), démarrage de l'OS (*Operating System*) FreeRTOS, tâches internes et mesures physiques. Les informations de connexion sont stockées dans la mémoire de rétention, ce qui économise les procédures MAC fastidieuses telles que le balayage de canal, l'authentification et l'association lors de la reconnexion. Sur la figure 4.4, le courant consommé par l'amplificateur permet d'identifier la phase de transmission des données, notée (9). Le courant consommé et la durée de cette étape (t_{wug} et I_{wug}) varient en fonction de la puissance de transmission et du nombre de trames à transmettre. Les valeurs théoriques et pratiques de l'échange qui a été décrit

TABLEAU 4.1 – Durée et courant consommé par une station non-TIM lors d’une phase de réveil

Étape	Durée		Courant Consommé		
	variable	valeur	variable	valeur (NRC-7292)	valeur (FEM)
(1)	t_{wu_1}	24 ms	I_{wu_1}	10,59 mA	0
(2)	t_{wu_2}	116 ms	I_{wu_2}	25,55 mA	0
(3)	t_{wu_3}	253 ms	I_{wu_3}	39,42 mA	3,16 mA
(4)	t_{wu_4}	148 ms	I_{wu_4}	20,02 mA	7,44 mA
(5)	t_{wu_5}	136 ms	I_{wu_5}	34,53 mA	7,44 mA
(6)	t_{wu_6}	326 ms	I_{wu_6}	38,24 mA	7,44 mA
(7)	t_{wu_7}	143 ms	I_{wu_7}	42,29 mA	7,44 mA
(8)	t_{wu_8}	185 ms	I_{wu_8}	34,53 mA	7,44 mA
(9)	t_{wu_9}	*	I_{wu_9}	34,53 mA	*
(10)	$t_{wu_{10}}$	100 ms**	$I_{wu_{10}}$	34,53 mA	7,44 mA

* dépend du nombre de trames échangées et des paramètres de transmission

** temps d’attente avant la mise en sommeil profond (paramètre configurable)

dans la partie 4.2.3 sont contenues dans le tableau 4.2. Les trames de contrôle sont transmises avec le MCS 10 et les trames CoAP avec le MCS 7. L’étape (10) correspond à un temps d’attente que doit respecter la station avant de retourner dans un état de sommeil profond.

TABLEAU 4.2 – Durée des trames échangées durant une phase de réveil.

Type de trame (tr)	MCS	MPDU $_{tr}$ (octets)	$N_{tx,tr}$ / $N_{rx,tr}$ *	Variable ($t_{tr,mcs}$)	Valeur théorique	Valeur mesurée
ARP	10	66	1/1	$t_{arp,10}$	4200 μ s	4204 μ s
NDP-ACK	10	0	2/4	t_{ack}	560 μ s	562 μ s
CoAP (post)	7	231	1/0	$t_{coappost,7}$ **	1200 μ s	1211 μ s
CoAP (ack)	7	70	0/1	$t_{coapack,7}$	760 μ s	768 μ s
QoS Data	10	30	2/0	$t_{qos,10}$	2280 μ s	2293 μ s

* nombre de trames transmises et reçues durant la phase (9)

** $t_{coappost}$ pour une trame de 165 octets, MCS=7 et BW=1MHz

Les valeurs recueillies dans les tableaux 4.1 et 4.2 sont utilisées pour construire le modèle de consommation énergétique décrit par la suite.

4.2.5 Mesure du courant consommé par une station TIM

Dans cette expérience, le courant consommé par la puce NRC-7292 et l’amplificateur RFFM-6901 est mesuré pour un mode de fonctionnement TIM. La puissance de transmission est fixée à 0 dBm, la bande passante à 1 MHz, le MCS à 7 et les trames balise TIM sont transmises toutes les 2 s. La STA est abonnée à une ressource *observable* de 121 octets, qui est stockée au niveau du serveur. Lorsque la valeur de cette ressource est modifiée, elle est automatiquement transmise au client CoAP qui y est abonné [71, 72, 74, 75, 96]. Dans cette expérience, la ressource est

modifiée toutes les 10 s et transmise à la STA dans un paquet CoAP de 138 octets (17 octets d'en-tête CoAP et 121 octets de données au format JSON). La figure 4.5 représente le courant consommé par la station pour différentes phases de réveil.

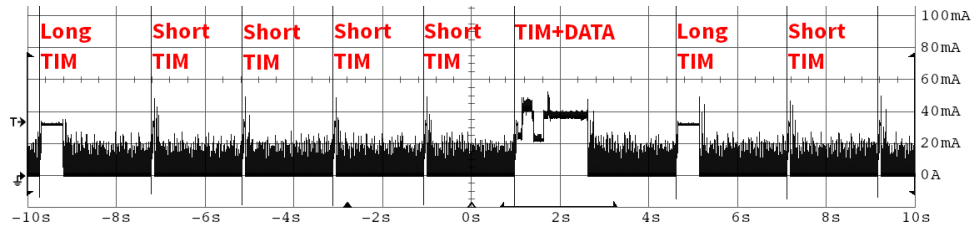


FIGURE 4.5 – Courant consommé par une station TIM lors de différentes phases de réveil.

La STA se réveille toutes les 2 s pour recevoir les trames balise TIM. La première est une balise TIM longue, suivie de cinq balises TIM courtes transmises toutes les 2 s. À la cinquième, la station 802.11ah se réveille totalement pour recevoir les 138 octets de données CoAP. Elle est informée de la présence d'un paquet CoAP dans la dernière trame balise TIM. La figure 4.6 représente le courant consommé par la puce NRC-7292 et l'amplificateur RFFM-6901 lors de la réception d'une trame TIM courte et d'une trame TIM longue avec la même base de temps. Les valeurs mesurées sont détaillées dans le tableau 4.3.

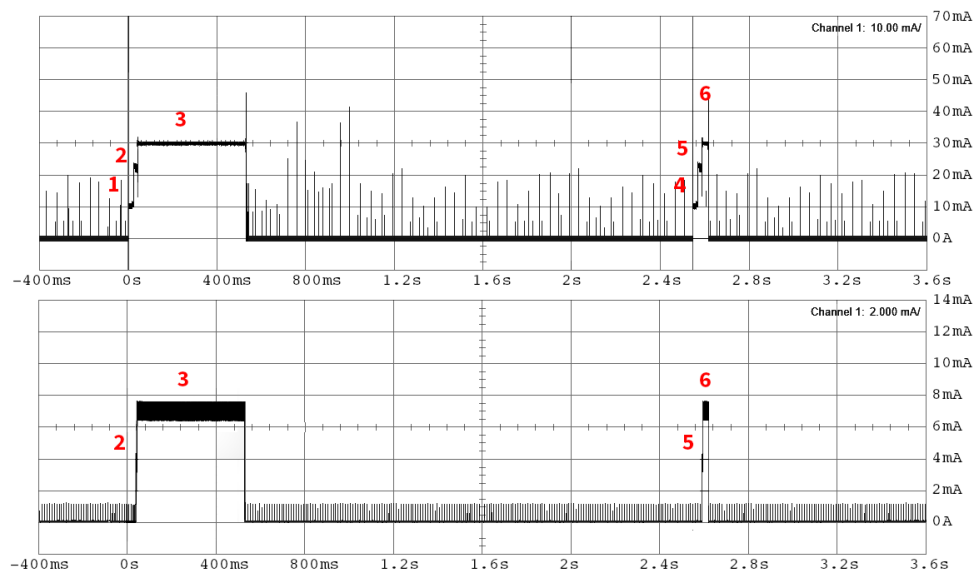


FIGURE 4.6 – Courant consommé par le circuit NRC-7292 et l'amplificateur RFFM-6901 lors d'une phase de réception des trames balise TIM.

Pour recevoir les trames balise TIM, la STA est mise dans un état appelé μ code. Dans ce mode, elle ne peut pas échanger des paquets avec l'AP, l'OS n'est pas démarré et la pile protocolaire TCP/IP n'est pas chargée. Le μ code est un programme exécuté uniquement en

TABLEAU 4.3 – Durée et courant consommé par une station TIM lors d’une phase de réception des trames balise TIM.

Trame Balise TIM	Phases	NRC-7292		FEM	
		durée	courant consommé	durée	courant consommé
Longue	(1)	22 ms	9,38 mA	0	0
	(2)	20 ms	22,83 mA	4 μ s	3,85 mA
	(3)	486 ms	29,78 mA	486 ms	7,03 mA
Courte	(4)	22 ms	9,57 mA	0	0
	(5)	20 ms	22,72 mA	4 μ s	3,72 mA
	(6)	27 ms	29,76 mA	27 ms	7,07 mA

couche MAC avec peu de ressources, afin de minimiser la consommation d’énergie. La STA reste dans cet état jusqu’à la réception d’une trame balise TIM. Si la STA est indiquée dans la carte virtuelle de la trame balise TIM, elle initie un réveil complet. Dans le cas contraire, elle retourne dans un état de sommeil profond. La transition de l’état μ code à l’état actif implique le chargement de l’OS et de la pile TCP/IP. Sur la figure 4.6, la STA est réveillée 72 ms pour recevoir une trame balise TIM courte et 525 ms pour recevoir une trame balise TIM longue. La longueur de la carte virtuelle TIM dépend du nombre de STA dans le réseau. Dans nos expériences, les trames balise TIM courtes transportent un MPDU de 34 octets et les trames balise TIM longues un MPDU de 104 octets. La figure 4.7 représente le courant consommé par le NRC-7292 et le FEM lors de la réception d’une balise TIM suivie d’un réveil complet et d’un transfert de données. Le tableau 4.4 détaille les valeurs pour chaque étape d’une phase de réveil.

TABLEAU 4.4 – Durée et courant consommé par une station TIM lors d’une phase de transmission de données.

Étape	Durée		Courant Consommé		
	variable	valeur	variable	valeur (NRC-7292)	valeur (FEM)
TIM	(voir tableau4.3)				
(2)	t_{wu2}	98 ms	I_{wu2}	23,67 mA	112,3 mA
(3)	t_{wu3}	263 ms	I_{wu3}	39,42 mA	3,16 mA
(4)	t_{wu4}	232 ms	I_{wu4}	20,00 mA	7,44 mA
(5)	t_{wu5}	97 ms	I_{wu5}	34,53 mA	7,44 mA
(6)	t_{wu6}	71 ms	I_{wu6}	42,29 mA	7,44 mA
(7-8)	$t_{wu7} + t_{wu8}$	714 ms	$I_{wu7} + I_{wu8}$	35,53 mA	7,44 mA
(9)	t_{wu9}	*	I_{wu9}	34,53 mA	*
(10)	t_{wu10}	100 ms**	I_{wu10}	35,53 mA	7,44 mA

* dépend du nombre de trames échangées et des paramètres de transmission

** temps d’attente avant la mise en sommeil profond (paramètre configurable)

Le passage de l’état μ code à l’état actif comprend l’initialisation des différents modules, le

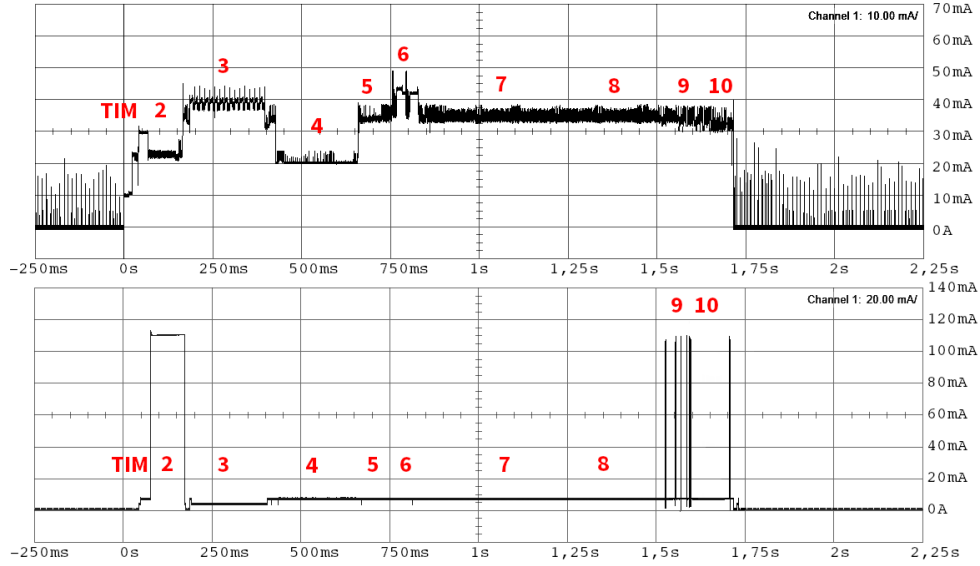


FIGURE 4.7 – Courant consommé par le circuit NRC-7292 et l’amplificateur RFFM-6901 lors d’une phase de transmission de données.

démarrage de l’OS, la connexion et la transmission des données. En comparant les tableaux 4.1 et 4.4, on remarque que la durée et le courant consommé par le NRC-7292 et le FEM pendant les phases (3) à (10) sont identiques pour le mode de fonctionnement TIM et non-TIM. Durant la phase (2), le FEM consomme un courant élevé. Cette phase correspond à l’initialisation de la STA et se produit juste après la réception de la trame de balise TIM. Le circuit FEM n’est plus contrôlé par le circuit NRC-7292, ce qui pourrait expliquer la valeur élevée du courant consommé. La phase de transmission des données est identifiable à l’étape (9) sur la figure 4.7. Le nombre et la durée des trames échangées durant cette phase sont détaillés dans le tableau 4.5. Après avoir reçu les données au format JSON, la station retourne dans un état de sommeil profond. Les valeurs recueillies dans les tableaux 4.4 et 4.5 sont utilisées pour construire le modèle de consommation énergétique décrit par la suite.

TABLEAU 4.5 – Durée des trames échangées durant une phase de réveil.

Type de trame (tr)	MCS	MPDU _{tr} (octets)	$N_{tx,tr} / N_{rx,tr}$ *	Variable ($t_{tr,mcs}$)	Valeur théorique	Valeur mesurée
ARP	10	66	1/1	$t_{arp,10}$	4200 μ s	4216 μ s
NDP-ACK	10	0	2/4	t_{ack}	560 μ s	560 μ s
CoAP (observable)	7	231	0/1	$t_{coapObs,7}$ **	1120 μ s	1129 μ s
CoAP (ack)	7	70	1/0	$t_{coapack,7}$	760 μ s	763 μ s
QoS Data	10	30	2/0	$t_{qos,10}$	2280 μ s	2287 μ s

* nombre de trames transmises et reçues durant la phase (9)

** $t_{coapObs}$ pour une trame de 138 octets, MCS=7 et BW=1MHz

4.2.6 Mesure du courant consommé par l'amplificateur (FEM)

Les expériences précédentes ont été réalisées avec une puissance d'émission configurée à 0 dBm. Le courant consommé par l'amplificateur dépend de cette puissance d'émission. Dans les précédentes expériences, nous avons également mesuré le courant consommé par le circuit FEM pour plusieurs puissances d'émission et les résultats sont présentés dans le tableau 4.6. La documentation technique du circuit NRC-7292 indique que le courant consommé par l'amplificateur est égal à 350 mA pour une puissance d'émission de 23 dBm, ce qui correspond à nos mesures avec une erreur inférieure à 2% [152].

TABLEAU 4.6 – Courant consommé par le circuit RFFM-6901 en transmission.

Puissance de transmission	Courant consommé par le FEM (3,3 V)	Puissance de transmission	Courant consommé par le FEM (3,3 V)
0 dBm	112,48 mA	14 dBm	165,40 mA
3 dBm	115,26 mA	17 dBm	207,90 mA
7 dBm	120,75 mA	20 dBm	278,83 mA
10 dBm	129,85 mA	23 dBm	357,31 mA

Le module RFFM-6901 consomme 7,44 mA en réception. En transmission, il consomme 112 mA pour une puissance d'émission à 0 dBm. Le courant reste inférieur à 150 mA pour une puissance inférieure à 12 dBm, puis il augmente jusqu'à 350 mA pour une puissance de 23 dBm. La distance maximale entre les appareils dépend de la puissance d'émission. Aux États-Unis, la puissance maximale autorisée est de 23 dBm, ce qui permet d'atteindre 1 km avec le MCS 10. En Europe, la puissance est limitée à 14 dBm, ce qui permet d'atteindre une distance de 500 m avec le MCS 10 (équation 3.12 et figure 3.12). L'efficacité énergétique dépend donc de la distance, de la puissance de transmission et de la durée des trames échangées.

4.3 Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah

4.3.1 Analyse théorique de l'énergie consommée

Dans cette partie, les résultats de mesures sont utilisées pour évaluer la durée de vie d'une STA en fonction de son mode de fonctionnement. L'énergie consommée à chaque étape d'une phase de réveil est obtenue par l'équation (4.1) :

$$E = E_{wu} + E_{tx} + E_{rx}, \quad (4.1)$$

et l'énergie consommée par bit utile transmis est obtenue par l'équation (4.2) :

$$E_{\text{bit}} = \frac{E}{8 \cdot N_{\text{DATA}}}, \quad (4.2)$$

où E , E_{bit} , E_{wu} , E_{tx} et E_{rx} correspondent respectivement à l'énergie consommée par la station pendant une phase de réveil, à l'énergie consommée par bit utile transmis, à l'énergie consommée par la station pour le réveil et l'initialisation, et enfin à l'énergie consommée par la station pour la transmission et la réception des données. N_{DATA} est le nombre d'octets de données transmis au cours de ce cycle. Il convient de noter que l'énergie E_{wu} dépend du matériel. Pour celui utilisé dans ces expériences, elle peut être calculée en utilisant l'équation (4.3) :

$$E_{\text{wu}} = V_{\text{sta}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{10} I_{\text{wu}_i} \cdot t_{\text{wu}_i} \right), \quad (4.3)$$

où V_{sta} , I_{wu_i} et t_{wu_i} correspondent respectivement à la tension d'alimentation, à la somme des courants consommés par le circuit NRC-7292 et le module frontal RFFM-6901, et à la durée de chaque phase notée (1) à (8) et (10) sur les figures 4.4 et 4.7. Les valeurs proviennent des mesures réalisées dans la partie 4.2.4. L'énergie consommée par la station à l'étape (9) est obtenue par les équations (4.4) et (4.5) :

$$E_{\text{rx}} = V_{\text{sta}} \cdot I_{\text{rx}} \cdot t_{\text{rx}}, \quad (4.4)$$

$$E_{\text{tx}} = V_{\text{sta}} \cdot I_{\text{tx}} \cdot t_{\text{tx}}, \quad (4.5)$$

où t_{rx} , t_{tx} , I_{rx} et I_{tx} correspondent respectivement à la durée et au courant consommé pendant les phases de réception et de transmission. Dans les expériences, la station est configurée pour échanger des données CoAP avec le serveur lwM2M. Les durées de transmission et de réception de la station sont obtenues avec les équations (4.6) et (4.7) :

$$t_{\text{tx}} = N_{\text{tx,arp}} \cdot t_{\text{arp},10} + N_{\text{tx,coap}} \cdot t_{\text{coap}_{\text{post}},\text{mcs}} + N_{\text{tx,qos}} \cdot t_{\text{qos},10} + N_{\text{tx,ack}} \cdot t_{\text{ack}}, \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{rx}} = & N_{\text{rx,arp}} \cdot (t_{\text{aifs}} + t_{\text{rx,arp}} + t_{\text{sifs}}) + N_{\text{tx,arp}} \cdot (t_{\text{aifs}} + t_{\text{sifs}} + t_{\text{ack}}) \\ & + N_{\text{rx,coap}} \cdot (t_{\text{aifs}} + t_{\text{coap}_{\text{ack}},\text{mcs}} + t_{\text{sifs}}) + N_{\text{tx,coap}} \cdot (t_{\text{aifs}} + t_{\text{sifs}} + t_{\text{ack}}) \\ & + N_{\text{tx,qos}} \cdot (t_{\text{aifs}} + t_{\text{sifs}} + t_{\text{ack}}), \end{aligned} \quad (4.7)$$

où t_{ack} , $t_{\text{arp},10}$, $t_{\text{coap}_{\text{post}},\text{mcs}}$, $t_{\text{coap}_{\text{ack}},\text{mcs}}$ et $t_{\text{qos},10}$ correspondent respectivement aux durées de transmission de chaque trame. Les valeurs sont détaillées dans les tableaux 4.2 et 4.5. La station reste en mode réception pendant les temps d'attente du mécanisme CSMA/CA. t_{aifs} et t_{sifs} sont les temps AIFS et SIFS de la norme 802.11ah pour une QoS *Best Effort* [107]. La durée des trames de transmission (t_{ack} , $t_{\text{arp},10}$, $t_{\text{coap}_{\text{post}},\text{mcs}}$, $t_{\text{coap}_{\text{ack}},\text{mcs}}$ et $t_{\text{qos},10}$) est obtenue à l'aide de l'équation (2.10).

4.3.2 Énergie consommée pendant une phase de réveil

Les figures 4.8 et 4.9 représentent la durée et l'énergie consommée par la station pour chaque trame transmise durant une phase de réveil.

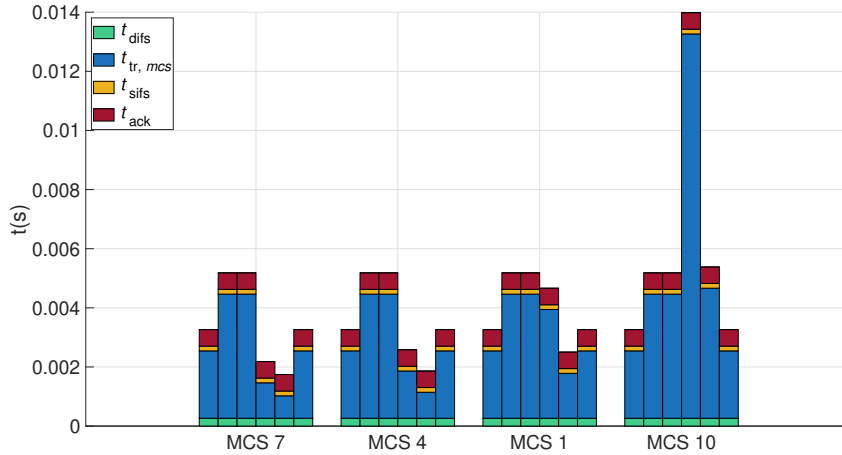


FIGURE 4.8 – Durée des différentes trames échangées par la station durant une phase de réveil.

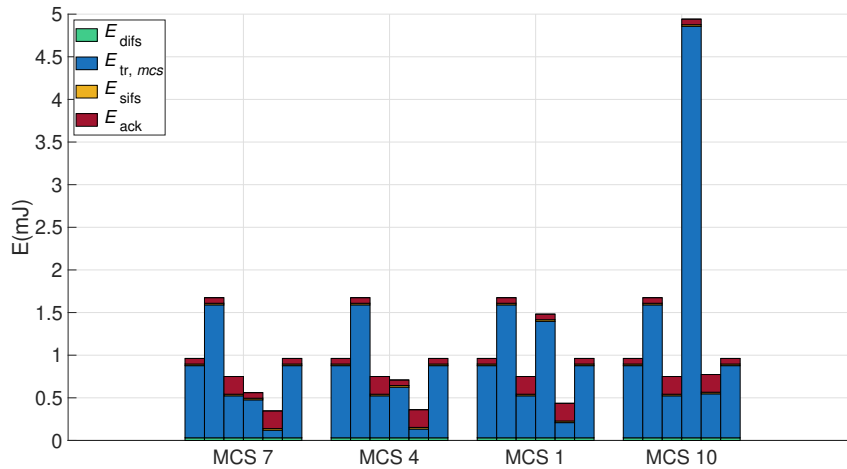


FIGURE 4.9 – Énergie consommée par la station pour les différentes trames échangées durant une phase de réveil, en fonction du MCS utilisé.

Chaque groupe de barre correspond à un échange réalisé avec un MCS particulier et chaque barre représente l'échange d'une trame. La première et la dernière correspondent à la transmission des trames QoS, utilisées par la station pour informer l'AP de son état de réveil ou de mise en sommeil. La deuxième et la troisième barre concernent l'échange ARP entre la STA et l'AP pour mettre en correspondance les adresses IP/MAC. La quatrième et la cinquième barre représentent l'échange CoAP entre la STA et le serveur réalisé avec un MCS qui peut varier en fonction de la distance. L'énergie consommée par la station pour transmettre les données CoAP

augmente avec le MCS. Les trames QoS et ARP sont toujours transmises avec le MCS 10 afin d'être reçues et décodées par toutes les stations du réseau. Le paquet CoAP transmis par la station contient 121 octets et la réponse du serveur 4 octets.

La durée de transmission et l'énergie consommée augmentent uniquement pour l'échange des trames CoAP. La durée de l'échange d'une trame QoS est de 3,26 ms et celle d'une trame ARP de 5,18 ms. La durée de l'échange d'une trame de données CoAP est de 2,18 ms avec un MCS 7 et 13,98 ms avec un MCS 10. La durée de l'échange d'une réponse CoAP est de 1,74 ms avec un MCS 7 et 5,38 ms avec un MCS 10. La station consomme 0,96 mJ pour transmettre les trames QoS, 1,67 mJ pour transmettre la trame ARP et 0,93 mJ pour recevoir la réponse ARP. Elle consomme 0,56 mJ pour transmettre la trame de données CoAP avec un MCS 7 et 4,06 mJ avec un MCS 10. Elle consomme 0,34 mJ pour recevoir la réponse CoAP avec un MCS 7 et 0,77 mJ avec un MCS 10. L'énergie consommée pour transmettre des données augmente avec le MCS et ce dernier dépend de la distance séparant la station de l'AP. Avec un MCS 7, la station consomme plus d'énergie à transmettre les trames de gestion et de contrôle que les trames de données.

4.3.3 Énergie consommée par bit utile transmis

L'énergie consommée par bit utile transmis est représentée sur la figure 4.10. Les courbes sont tracées à l'aide de l'équation (4.2) et des mesures réalisées dans la partie 4.2.4. La phase de réveil, d'initialisation et de transmission est prise en compte, mais pas la phase de sommeil profond. La charge utile varie entre 50 et 350 octets, la puissance de transmission est fixée à 0 et 23 dBm et la bande passante à 1 MHz.

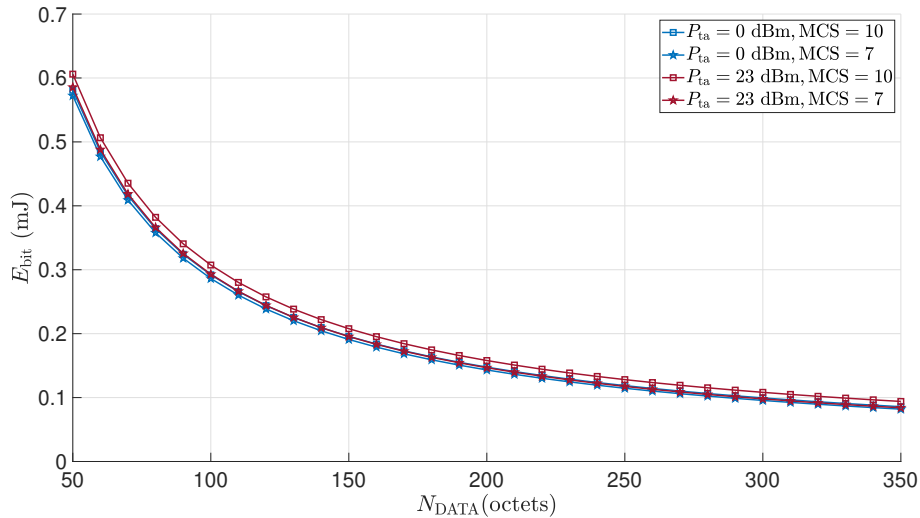


FIGURE 4.10 – Énergie par bit utile consommée par la station lors d'une phase de réveil en fonction de la taille des données transportées dans le paquet CoAP.

L'énergie par bit utile diminue avec le nombre d'octets de données transmis, dans un rapport d'un sixième entre une charge de 50 et 350 octets. Lorsque la charge est supérieure à 150 octets, l'énergie consommée est inférieure à 0,25 mJ/bit utile. Entre 150 et 350 octets, l'énergie par bit utile est divisée par 2. La différence de consommation d'énergie entre les différents MCS, les différentes largeurs de bande et les puissances de transmission configurées est faible, ce qui signifie que l'énergie consommée lors du démarrage n'est pas négligeable par rapport à l'énergie consommée lors d'une transmission. Le rapport est d'un vingtième.

4.3.4 Prédiction de la durée de vie des stations

La durée de vie d'un objet IoT est directement liée à l'énergie qu'il consomme pour réaliser ses tâches, et donc indirectement à la durée passée dans chaque état d'un cycle de fonctionnement. La durée d'un cycle est obtenue en utilisant l'équation (4.8) :

$$t_{\text{cyc}} = t_{\text{wu}} + t_{\text{tx}} + t_{\text{rx}} + t_{\text{sleep}}, \quad (4.8)$$

où t_{cyc} et t_{sleep} correspondent respectivement à la durée d'un cycle et à la durée passée par la STA dans un état de sommeil et de réception des trames TIM. L'énergie consommée par la station durant ce cycle est déterminée à l'aide de l'équation (4.9) :

$$E_{\text{cyc}} = \begin{cases} E_{\text{wu}} + E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} + V_{\text{sta}} \cdot I_{\text{sleep}} \cdot t_{\text{sleep}} & \text{pour un mode non-TIM,} \\ \begin{aligned} & E_{\text{wu}} + E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} \\ & + \frac{t_{\text{sleep}}}{t_{\text{tbtt}}} \left(\frac{1}{N_{\text{tim}}} (E_{\text{dtim}} + (t_{\text{tbtt}} - t_{\text{dtim}}) \cdot V_{\text{sta}} \cdot I_{\text{sleep}}) \right) \\ & + \frac{t_{\text{sleep}}}{t_{\text{tbtt}}} \left(\frac{N_{\text{tim}} - 1}{N_{\text{tim}}} (E_{\text{tim}} + (t_{\text{tbtt}} - t_{\text{tim}}) \cdot V_{\text{sta}} \cdot I_{\text{sleep}}) \right) \end{aligned} & \text{pour un mode TIM,} \end{cases} \quad (4.9)$$

où E_{cyc} , E_{tim} , E_{dtim} représentent l'énergie consommée par la station lors d'un cycle de fonctionnement, et lors de la réception des trames balise TIM et DTIM. t_{tbtt} , t_{tim} et t_{dtim} correspondent au temps d'attente entre deux trames balise TIM et à la durée des trames TIM et DTIM. N_{tim} représente la proportion de trames TIM et DTIM reçues durant un cycle de fonctionnement. Finalement, la durée de vie de la station est obtenue en utilisant l'équation (4.10) :

$$t_{\text{vie}} = \frac{E_{\text{src}} \cdot t_{\text{cyc}}}{E_{\text{cyc}}} \quad (4.10)$$

où E_{src} et t_{vie} représentent l'énergie disponible au niveau de la source d'alimentation et le temps de service (ou durée de vie) de la station.

Pour transmettre 121 octets de données toutes les 10 s, la station consomme 322 mJ en mode TIM et 226 mJ en mode non-TIM. Ces résultats sont obtenus avec l'équation (4.1) et les valeurs contenues dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5. Le tableau 4.7 contient les valeurs de la

consommation d'énergie et la durée de vie d'une station alimentée par une batterie standard de 2 000 mA.h pour différents cycles d'utilisation. Ces valeurs sont calculées pour une balise TIM transmise toutes les 2 s et une balise DTIM toutes les 5 balises TIM.

TABLEAU 4.7 – Durée de vie et énergie consommée par une station 802.11ah pour différents cycles de fonctionnement.

Cycle de fonctionnement	Mode	Énergie consommée			Durée de vie (t_{vie})
		μcode (TIM)	État actif	Sommeil	
10 s	non-TIM	0 mJ	225,70 mJ	0,604 mJ	13,25 jours
	TIM	72,46 mJ	248,96 mJ	0,555 mJ	9,31 jours
60 s	non-TIM	0 mJ	225,70 mJ	3,62 mJ	78,48 jours
	TIM	434,77 mJ	248,96 mJ	3,33 mJ	26,19 jours
15 min	non-TIM	0 mJ	225,70 mJ	54,38 mJ	963,99 jours
	TIM	6 521,63 mJ	248,96 mJ	49,95 mJ	39,58 jours
60 min	non-TIM	0 mJ	225,70 mJ	217,52 mJ	2 436,67 jours
	TIM	26 086,52 mJ	248,96 mJ	199,83 mJ	40,70 jours

Le temps de service dépend du courant consommé par la STA, de la durée des phases de réveil, du cycle de service et du nombre de réveils nécessaires pour recevoir les balises TIM et DTIM. Pour le mode non-TIM, la durée de vie de la station est de 78 jours pour un réveil toutes les 60 s, 2 ans pour un réveil toutes les 15 minutes et 7 ans pour un réveil toutes les heures. La durée de vie augmente proportionnellement avec le cycle de fonctionnement. En mode TIM, la durée de vie de la station est de 26 jours pour un réveil toutes les 60 s, 39 jours pour un réveil toutes les 15 minutes et 40 jours pour un réveil toutes les heures. Par rapport à un cycle de fonctionnement de 10 s, la durée de vie augmente uniquement dans un rapport de 3 à 4, en raison de la réception de balises TIM et DTIM toutes les 2 s. Il convient de noter que ce modèle ne prend pas en compte le comportement de la source d'alimentation dont les performances peuvent être fortement affectées par l'environnement, en particulier la température [173, 174]. À noter que la modélisation de la source d'énergie n'entre pas dans le cadre de cette étude.

4.3.5 Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah

Les expériences menées dans ce chapitre illustrent la différence entre le cas d'utilisation TIM et le cas non-TIM. Le fonctionnement de ces deux mécanismes est détaillé dans le chapitre 2. En mode TIM, la station consomme plus d'énergie pour la même quantité de données échangées car elle doit se réveiller pour recevoir les trames balise. Si les données sont transmises dans des créneaux protégés par l'AP, l'énergie mesurée correspond à un fonctionnement TIM/RAW. En mode non-TIM, la STA consomme moins d'énergie car elle n'a pas l'obligation de se réveiller pour recevoir les trames balise. Si les données sont transmises dans des créneaux protégés par l'AP, l'énergie mesurée correspond à un fonctionnement non-TIM/TWT.

Dans cette partie, l'efficacité énergétique a été étudiée sans tenir compte de l'environnement, ou en considérant que l'accès au média est protégé par l'utilisation du mécanisme TWT ou RAW. Ces mécanismes visent à fournir un temps d'accès équitable au média en réservant des créneaux d'accès selon le besoin des stations en terme de trafic. La norme recommande aux STA de transmettre uniquement à l'intérieur des créneaux qui leur sont assignés, mais elle donne également la possibilité aux STAs de transmettre en dehors de ces périodes, en utilisant le mécanisme DCF ou EDCA. Les mécanismes RAW et TWT sont optionnels et le mécanisme privilégié reste le DCF/EDCA.

Les résultats des mesures montrent qu'il existe trois façons d'améliorer l'efficacité énergétique d'une STA fonctionnant en mode TIM/RAW ou non-TIM/TWT. La première consiste à réduire le temps de réveil et de démarrage du système d'exploitation. La deuxième consiste à définir précisément le cycle de réveil en fonction du cas d'utilisation et du temps écoulé entre chaque balise TIM. La dernière consiste à augmenter la quantité de données transmises par phase de réveil, en utilisant par exemple l'aggrégation de trames (2.3.8) ou le mécanisme TxOP (2.3.4).

4.4 Modélisation de la consommation énergétique d'une station 802.11ah

Dans cette partie, la consommation énergétique d'une station 802.11ah est étudiée en tenant compte de son environnement, c'est à dire lorsque plusieurs stations tentent d'accéder au média au même instant. Ce type de situation est envisagé lorsqu'une STA doit partager son créneau d'accès RAW ou TWT avec d'autres STAs ou lorsqu'elle fonctionne en mode *Unscheduled* STA.

4.4.1 Définition du modèle de propagation

Le modèle de consommation énergétique proposé dans cette partie s'appuie sur un modèle de propagation générique et une répartition homogène de N STAs autour d'un AP. Les stations ne se déplacent pas et elles se trouvent à une distance inférieure ou égale à celle correspondant à une transmission avec le MCS 10. Le MCS utilisé pour transmettre les données CoAP dépend de cette distance et donc du modèle de propagation. La distance entre la STA et l'AP est déterminée en utilisant le modèle de propagation isotrope donné dans l'équation (4.11) [111, 112] :

$$PL(d_{sta}) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi f_c}{c} \right) + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d_{sta}) \quad [\text{dB}], \quad (4.11)$$

où $PL(d_{sta})$, d_{sta} , f_c , c et γ correspondent respectivement au modèle de perte, à la distance entre l'émetteur et le récepteur, à la fréquence porteuse, à la vitesse des ondes électromagnétiques et à l'indice d'affaiblissement de propagation. $f_c = 863,5$ MHz et $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Pour la suite, la valeur de l'indice d'affaiblissement γ est égale à 3, ce qui correspond à l'environnement des

mesures réalisées en extérieur dans le chapitre 3 et à la valeur déterminée dans l'équation (3.12).

4.4.2 Modélisation de l'environnement d'une station 802.11ah

La figure 4.11 représente une station positionnée à la distance maximale de l'AP. Sur la figure, l'AP est placé au milieu du réseau et il est entouré de cercles concentriques qui représentent la distance maximale de réception du signal en fonction du MCS. Les stations qui utilisent le MCS 7 se trouvent dans la première zone autour de l'AP, et ainsi de suite jusqu'aux stations utilisant le MCS 10. Le cercle en trait plein autour de la STA représente sa zone d'écoute des transmissions provenant des autres stations du réseau.

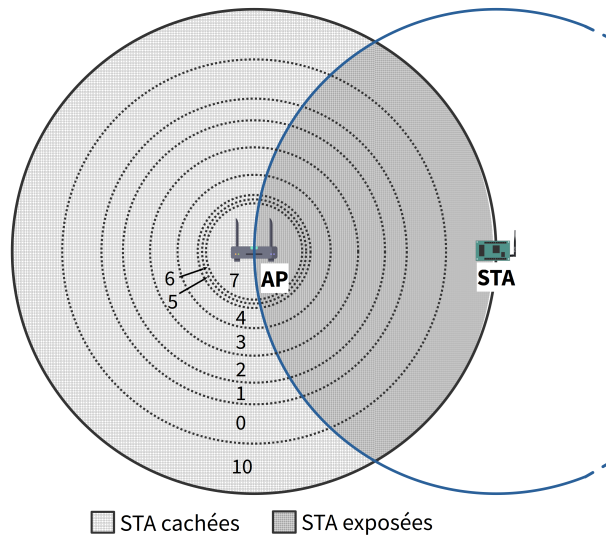


FIGURE 4.11 – Représentation des zones cachées et exposées pour une station utilisant un MCS 10.

Les capacités de réception et de détection d'une station dépendent de la distance qui la sépare de l'AP et des autres STAs du réseau. Avec une bande passante de 1 MHz, le mécanisme CCA-SD peut décoder un signal de niveau supérieur ou égal à -98 dBm et le mécanisme CCA-ED peut détecter une source d'interférences d'un niveau supérieur ou égal à -72 dBm. Dans cette étude, on considère qu'il n'y a pas d'autres réseaux à proximité, donc pas d'interférences. Les distances de réception et de détection d'une autre transmission sont obtenues par les équations (4.12) et (4.13) [175-178] :

$$d_{rx} = \sqrt[3]{\left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \cdot \frac{P_{ta}}{thrd_{rx}}}, \quad (4.12)$$

$$d_{csr} = \sqrt[3]{\left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \cdot \frac{P_{ta}}{thrd_{csr}}}, \quad (4.13)$$

où d_{rx} , d_{csr} , P_{ta} , $thrd_{rx}$ et $thrd_{csr}$ correspondent respectivement à la portée de réception, la portée de détection d'une porteuse, la puissance d'émission, le seuil de réception et le seuil de détection de la porteuse. Le seuil de réception dépend du MCS utilisé et le seuil de détection des autres transmissions est constant et égal à la sensibilité du MCS 10. Les valeurs de sensibilité sont synthétisées dans le tableau 2.7. Une station située à d_{csr} d'une transmission en cours doit différer sa propre transmission jusqu'à ce que le canal soit libre. Toutes les stations situées dans la zone où les deux cercles se croisent sont considérées comme exposées. Les stations situées dans l'autre zone sont considérées comme cachées. La superficie de chaque zone (cachée et exposée) est déterminée pour chaque MCS en calculant l'aire d'une "lune" (annexe B). En supposant que le réseau d'intérêt est composé de 8000 STAs, le tableau 4.8 contient la proportion et le nombre de stations qui utilisent chaque MCS ($p_{sta,mcs}$ et $N_{sta,mcs}$). Nous considérons que les STAs sont réparties uniformément autour de l'AP et qu'elles présentent des caractéristiques physiques homogènes en termes de transmission et de portée. Le tableau 4.9 contient le pourcentage de dispositifs exposés et cachés en fonction de la position de la STA par rapport à l'AP ($p_{e_{sta,mcs}}$ et $p_{h_{sta,mcs}}$).

TABLEAU 4.8 – Portée de transmission et pourcentage de stations utilisant un MCS ($N = 8000$ STAs).

MCS (mcs)	$d_{rx,mcs}$		$N_{sta,mcs}$	$p_{sta,mcs}$
	$P_{ta} = 23$ dBm	$P_{ta} = 14$ dBm		
7	189,72 m	95,09 m	318	3,98%
6	204,86 m	102,67 m	53	0,66%
5	221,20 m	110,86 m	61	0,77%
4	300,70 m	150,70 m	367	4,58%
3	408,76 m	204,86 m	678	8,48%
2	514,59 m	257,91 m	864	10,80%
1	599,97 m	300,70 m	842	10,52%
0	755,32 m	378,56 m	1862	23,28%
10	950,90 m	476,57 m	2952	36,90%

La proportion de stations exposées diminue en fonction de la distance entre la station et l'AP. A l'inverse, la proportion de stations cachées augmente avec la distance. Une station située à une distance inférieure à 189,72 m de l'AP fonctionne en MCS 7. À cette distance, 100% des stations qui utilisent le MCS 7 sont exposées et 0% sont cachées, 81,86% des stations qui utilisent le MCS 10 sont exposées et 18,13% sont cachées. Une station située à une distance de 950,90 m de l'AP opère avec le MCS 10. À cette distance, 48,18% des stations qui utilisent le MCS 7 sont exposées et 51,81% sont cachées, 35,13% des stations qui utilisent le MCS 10 sont exposées et 64,86% sont cachées. La proportion de stations exposées et cachées a un impact direct sur la consommation d'énergie, car le risque de collision évolue en fonction de ces proportions.

Le modèle proposé ici est simple et générique. Il ne prend pas en compte les différents

TABLEAU 4.9 – Proportion de stations exposées et cachées en fonction de la distance séparant la STA et l'AP ($P_{ta} = 23$ dBm).

MCS (mcs)	$d_{rx,7} = 100$ m		$d_{rx,10} = 950$ m	
	$p_{e_{sta},mcs}$	$p_{h_{sta},mcs}$	$p_{e_{sta},mcs}$	$p_{h_{sta},mcs}$
7	100%	0%	48,18%	51,81%
6	100%	0%	46,83%	53,16%
5	100%	0%	46,55%	53,44%
4	100%	0%	44,69%	54,30%
3	100%	0%	44,05%	55,94%
2	100%	0%	42,21%	57,78%
1	100%	0%	40,55%	59,44%
0	100%	0%	38,37%	61,62%
10	81,86%	18,13%	35,13%	64,86%

évanouissements et pertes de trajet, propres à chaque environnement. Il peut néanmoins être facilement remplacé par un modèle plus complexe.

4.4.3 Modélisation du fonctionnement d'une station 802.11ah

Modèle de Markov

Le fonctionnement d'une station 802.11ah est modélisé à l'aide d'un outil générique basé sur des chaînes de Markov absorbantes [179]. La solution qui est proposée ici s'appuie sur les expérimentations réalisées dans la partie 4.2 pour adapter cet outil mathématique au protocole 802.11ah. La figure 4.12 représente une chaîne de Markov qui modélise les opérations réalisées par une station lors d'un cycle de fonctionnement. La STA ne connaît pas l'état dans lequel se trouve les autres STAs du réseau, ni leurs répartitions géographiques autour de l'AP. Chaque STA peut se réveiller et générer des données à transmettre avec une probabilité p_λ .

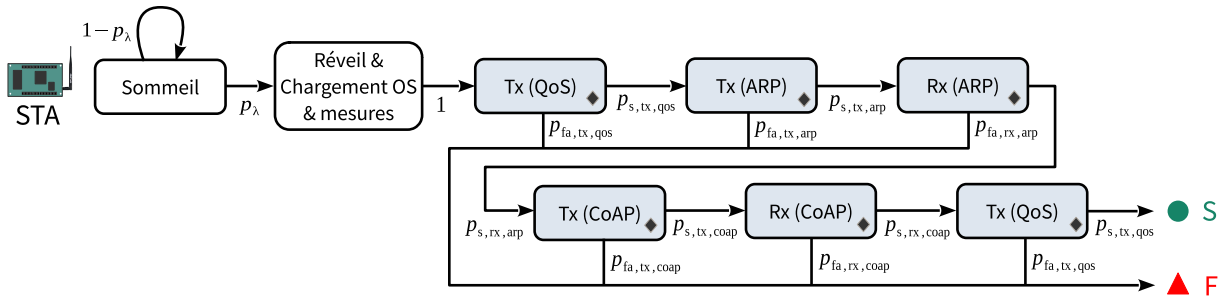


FIGURE 4.12 – Modélisation du cycle de fonctionnement d'une station 802.11ah.

A chaque réveil, la station démarre son système d'exploitation, prépare et configure les services réseau, effectue les mesures physiques et transmet les données au serveur. Les opérations de transmission sont marquées d'un losange. La station commence par envoyer une trame QoS

null data pour informer l’AP de son réveil, suivi d’un échange de trames ARP pour établir la correspondance des adresses IP/MAC et d’un échange de données CoAP. La session se termine par la transmission d’une trame QoS *null data* qui permet à la STA d’informer l’AP de son retour dans un état de sommeil profond. Si toutes les trames sont transmises avec succès (p_s), on considère que la STA a correctement envoyé ses données (● S). Elle peut retourner dans un état de sommeil en attendant la prochaine transmission. A contrario, si la transmission d’une trame se solde par un échec (p_{fa}), on considère que la STA n’a pas envoyé ses données (▲ F). Elle retourne dans un état de sommeil et les données sont perdues. Chaque transmission est modélisée indépendamment par une chaîne de Markov absorbante, représentée sur la figure 4.13.

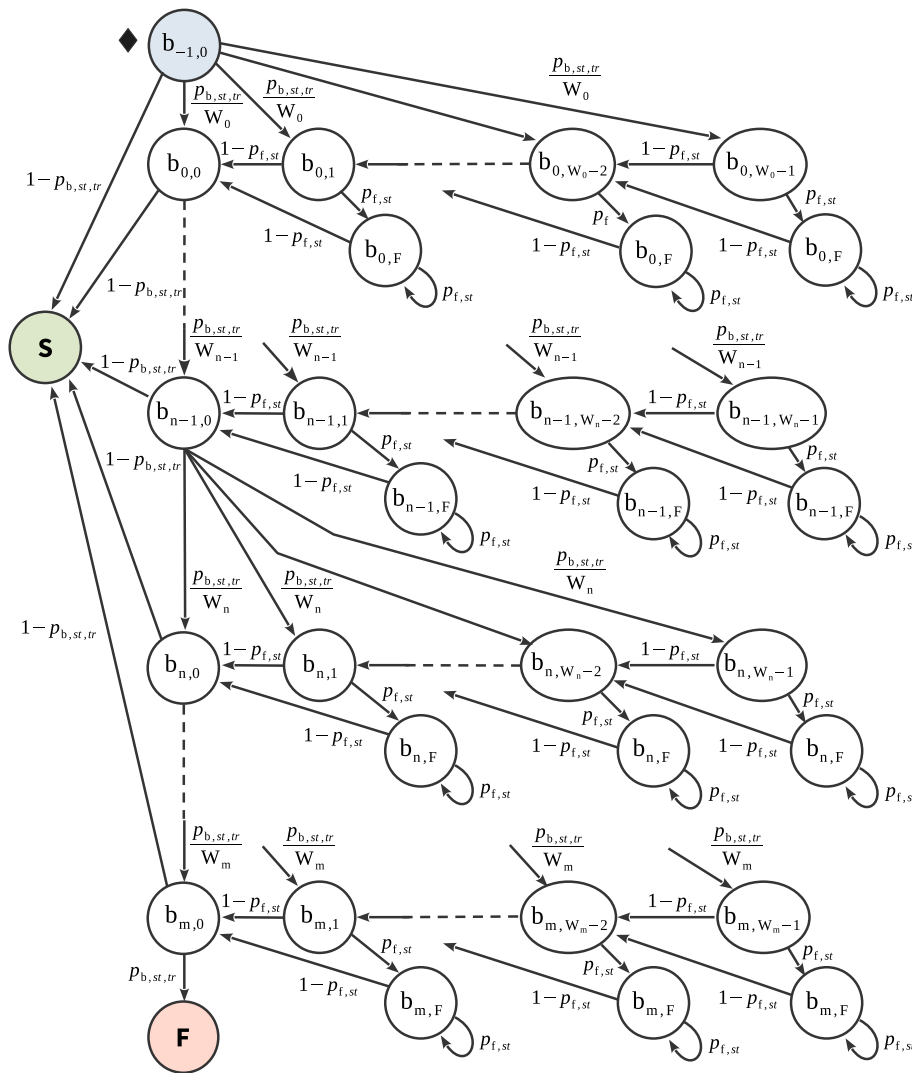


FIGURE 4.13 – Modélisation d’une tentative d’accès au média avec le mécanisme DCF/EDCA.

Dans la théorie des probabilités, une chaîne de Markov absorbante est une chaîne de Markov

dans laquelle chaque état peut atteindre un état absorbant. Un état absorbant est un état, qui une fois atteint, ne peut plus être quitté. Un état qui n'est pas absorbant est transitoire. Cette chaîne définit deux états absorbants, étiquetés S et F . Lorsque la station se trouve dans l'un des états marqués d'un losange sur la figure 4.12, elle passe dans l'état marqué d'un losange $\text{b}_{-1,0}$ sur la figure 4.13. Elle transite ensuite dans les différents états jusqu'à atteindre l'un des deux états absorbants. Chaque état correspond à une étape de fonctionnement du protocole EDCA, détaillé dans le chapitre 2.

Les états $\text{b}_{-1,0}$ à $\text{b}_{m,0}$ représentent les $m + 2$ tentatives de transmission que la station est autorisée à effectuer. En cas de succès, elle entre dans l'état absorbant S avec une probabilité $1 - p_{\text{b},st,tr}$, et quitte la chaîne de Markov absorbante. En cas d'échec, elle passe dans l'un des états notés $\text{b}_{n,0}$ à b_{n,W_n-1} avec une probabilité $\frac{p_{\text{b},st,tr}}{W_n}$. $p_{\text{b},st,tr}$ représente la probabilité qu'une autre STA démarre une transmission pendant la tentative ou qu'il y ait une erreur de transmission. n est le compteur de tentatives de retransmissions, il est compris dans l'intervalle $[0, m]$.

Pour chaque valeur de n , les états $\text{b}_{n,0}$ à b_{n,W_n-1} représentent les créneaux de la fenêtre de contention, définie pour minimiser le risque de collisions. La valeur maximale que peut prendre le compteur de contention double après chaque tentative qui se solde par un échec ($W_n = 2 \cdot W_{n-1}$). $p_{f,st}$ représente la probabilité qu'une autre STA démarre une transmission pendant un créneau de la fenêtre de contention. Si la station détecte une autre transmission, elle passe dans l'un des états $\text{b}_{n,F}$ avec la probabilité $p_{f,st}$. Lorsque la transmission de la station en contention est terminée, la station passe à l'état suivant avec la probabilité $1 - p_{f,st}$.

Cette représentation graphique de la chaîne de Markov est associée à la matrice de transition (4.14) :

$$M_{\text{b}} = \begin{array}{c} \text{b}_{-1,0} \\ \text{b}_{0,0} \\ \vdots \\ \text{b}_{m,0} \\ \vdots \\ \text{b}_{m,W_m-1} \\ \text{S} \\ \text{F} \end{array} \begin{array}{c} \text{b}_{-1,0} \quad \text{b}_{0,0} \quad \cdots \quad \text{b}_{n,0} \quad \cdots \quad \text{b}_{m,0} \quad \cdots \quad \text{b}_{m,W_m-2} \quad \text{b}_{m,W_m-1} \quad \text{S} \quad \text{F} \\ \left[\begin{array}{cccccccccc|cc} 0 & \frac{p_{\text{b},st,tr}}{W_0} & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 - p_{\text{b},st,tr} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 - p_{\text{b},st,tr} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 - p_{\text{b},st,tr} & p_{\text{b},st,tr} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 - p_{f,st} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{array} \quad (4.14)$$

où M_{b} est la matrice associée à la chaîne de Markov absorbante représentée sur la figure 4.13. $\text{b}_{-1,0}$ est l'état initial, S et F sont les états absorbants. Chaque cellule contient la probabilité de

passer d'un état référencé sur la ligne à un autre état référencé sur la colonne. Les probabilités de transition d'un état à l'autre dépendent des collisions et des erreurs de transmission. $p_{b,st,tr}$ et $p_{f,st}$ représentent l'environnement de la station considérée.

Dans la résolution de la contention du mécanisme EDCA, le temps est discret et divisé en créneaux. Une STA n'est autorisée à transmettre qu'au début de chaque créneau. On considère qu'une collision se produit lorsqu'au moins deux trames sont transmises dans le créneau de temps considéré. Pour les stations concurrentes, la transmission sera réussie si aucune autre station ne transmet dans ce créneau et pour les nœuds cachés, la période doit être étendue à l'ensemble de la durée d'une transmission de la station considérée [176-178]. Les valeurs de $p_{b,st,tr}$ et $p_{f,st}$ sont déterminées par les équations (4.15) et (4.16) :

$$p_{b,st,tr} = \begin{cases} 1 - (1 - p_{e,tr,mcs}) \cdot (1 - \tau)^{N_{\text{esta}}-1} \cdot \left((1 - \tau)^{N_{\text{hsta}}} \right)^{s_{\text{vul}}} & \text{si } st = \text{tx}, \\ 1 - (1 - p_{e,tr,mcs}) \cdot (1 - \tau)^{N_{\text{esta}}+N_{\text{hsta}}} & \text{si } st = \text{rx}, \end{cases} \quad (4.15)$$

$$p_{f,st} = \begin{cases} 1 - (1 - \tau)^{N_{\text{esta}}-1} \cdot (1 - \tau)^{N_{\text{hsta}}} & \text{si } st = \text{tx}, \\ 1 - (1 - \tau)^{N_{\text{esta}}+N_{\text{hsta}}} & \text{si } st = \text{rx}, \end{cases} \quad (4.16)$$

où τ , N_{hsta} et N_{esta} correspondent respectivement à la charge moyenne du réseau, c'est à dire la probabilité qu'une station soit dans un état de transmission, et au nombre de stations cachées et exposées. $st = \text{tx}$ pour un échange de la station vers l'AP et $st = \text{rx}$ pour un échange de l'AP vers la station. $p_{e,tr,mcs}$ est la probabilité d'erreur de transmission d'une trame de données, obtenue à partir de l'équation (3.11).

$p_{b,st,tr}$ représente la probabilité qu'une autre STA démarre une transmission pendant la tentative ou qu'il y ait une erreur de transmission. $1 - p_{e,tr,mcs}$ est la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur de transmission. $(1 - \tau)^{N_{\text{esta}}-1}$ est la probabilité qu'aucune STA exposée ne transmette des données pendant la tentative de transmission et $\left((1 - \tau)^{N_{\text{hsta}}} \right)^{s_{\text{vul}}}$ est la probabilité qu'aucune STA cachée ne transmette des données pendant une période étendue de la tentative de transmission. s_{vul} correspond à la surface de vulnérabilité d'une trame, qu'on estime être égale à 2 fois la durée totale d'une transmission [176-178] : $s_{\text{vul}} = \left\lceil \frac{2 \cdot t_{s,tr}}{t_{\text{slot}}} \right\rceil$. s_{vul} est égal à 0 lorsque l'échange est initié par l'AP à destination de la STA.

$(1 - \tau)^{N_{\text{esta}}-1} \cdot (1 - \tau)^{N_{\text{hsta}}}$ représente la probabilité qu'aucune autre STA exposée ou cachée ne transmette des données pendant le créneau de la fenêtre de contention. Les valeurs de N_{esta} et N_{hsta} sont obtenus avec les équations (4.17) et (4.18) :

$$N_{\text{esta}} = \sum_{mcs=0}^{10} (p_{\text{esta},mcs} \cdot N_{\text{sta},mcs}), \quad (4.17)$$

$$N_{\text{hsta}} = \sum_{mcs=0}^{10} (p_{\text{hsta},mcs} \cdot N_{\text{sta},mcs}), \quad (4.18)$$

où $N_{\text{sta},mcs}$, $p_{\text{esta},mcs}$ et $p_{\text{hsta},mcs}$ représentent respectivement le nombre de stations et le pourcentage de stations exposées et cachées en fonction du MCS. Le nombre et le pourcentage de stations sont obtenus en utilisant le modèle générique de répartition proposé dans la partie 4.4.2, et des valeurs sont contenues dans les tableaux 4.8 et 4.9.

Détermination du nombre de visites d'un état transitoire avant absorption

Les chaînes de Markov absorbantes sont traditionnellement utilisées pour trouver le nombre moyen d'étapes à réaliser avant d'être absorbé. Pour déterminer le nombre moyen de visite d'un état transitoire, la matrice M_b peut être décomposée en quatre blocs et réécrite sous la forme présentée dans l'équation (4.19) :

$$M_{r_m \times c_m} = \begin{bmatrix} Q_{r_q \times c_q} & R_{r_q \times 2} \\ 0_{2 \times c_q} & I_{2 \times 2} \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

$Q_{r_q \times c_q}$ représente la transition entre les différents états de $b_{-1,0}$ à b_{m,W_m-1} et $b_{n,F}$, avec $n \in [0, m]$. R_{r_q} représente les transitions entre les états transitoires et les états absorbants. $0_{2 \times c_q}$ est une matrice *nulle* et $I_{2 \times 2}$ une matrice *identité* qui modélise le côté absorbant de la chaîne de Markov.

Lorsque le processus commence dans un état transitoire identifié $b_{n,x}$, le nombre moyen de visite des états transitoires avant absorption est défini par la matrice *fondamentale* $N_{r_q \times c_q}$, avec $n \in [0, m]$ et $x \in [W_n, W_{n-1}]$. Cette matrice *fondamentale* est obtenue en réalisant l'opération présentée dans l'équation (4.20) :

$$N_{r_q \times c_q} = \sum_{k=0}^{\infty} Q_{r_q \times c_q}^k \delta = (I_{Q_{r_q \times c_q}} - Q_{r_q \times c_q})^{-1}, \quad (4.20)$$

où $I_{Q_{r_q \times c_q}}$ est une matrice *identité* et δ représente le nombre d'étapes attendues pour atteindre l'état transitoire. Dans ce modèle, $b_{-1,0}$ étant le seul état initial de M_b , il est possible de ne considérer que la première ligne de la matrice $N_{r_q \times c_q}$. Ce vecteur est noté n_{c_q} .

Détermination des probabilités de succès et d'échec

La transmission d'un paquet est réussie si la matrice $M_{r_m \times c_m}$ est absorbée par l'état S. De la même manière, la transmission est un échec si la matrice est absorbée par l'état F. La matrice d'absorption $B_{r_q \times 2}$, qui contient la probabilité d'être absorbé dans un état donné, est définie par l'équation (4.21) :

$$B_{r_q \times 2} = N_{r_q \times c_q} \cdot R_{r_q \times 2}. \quad (4.21)$$

Le nombre moyen d'étapes avant absorption sachant que l'on part de l'état $(b_{n,x})$ est la somme des termes de la n -ème ligne de la matrice *fondamentale* $N_{r_q \times c_q}$. L'état $b_{-1,0}$ est l'état initial de la matrice, les probabilités de succès et d'échec sont donc calculées en ne considérant que le vecteur n_{c_q} . La probabilité de transmission avec succès $(p_{s,st,tr})$ et la probabilité d'échec $(p_{fa,st,tr})$ décrites dans les équations (4.22) et (4.23), sont obtenues à partir de l'équation (4.21) :

$$p_{s,st,tr} = (1 - p_{b,st,tr}) \cdot \sum_{n=0}^{m+1} p_{b,st,tr}^n, \quad (4.22)$$

$$p_{fa,st,tr} = p_{b,st,tr}^{m+2}. \quad (4.23)$$

Détermination des probabilités de transmission et de collision

Un équipement Wi-Fi fonctionne en *half-duplex*, ce qui rend la détection des collisions impossible pendant une transmission. Lorsqu'il n'émet pas, il est en réception et recherche continuellement la présence d'un préambule de couche physique, signature unique d'une trame Wi-Fi. S'il détecte un préambule, il diffère sa transmission selon les règles d'évitement des collisions du mécanisme CSMA/CA. La probabilité de collision peut alors être définie comme la probabilité qu'une autre station commence une transmission durant un temps d'écoute. Dans ce modèle, le trafic de chaque station du réseau est défini comme la source d'un processus de *Poisson* dont l'intensité et la fonction de distribution cumulative complémentaire sont déterminées par les équations (4.24) et (4.25) :

$$\lambda = \frac{N_{\text{pkt}}}{t_{\text{ts}}}, \quad (4.24)$$

$$p_\lambda = 1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{sleep}}}, \quad (4.25)$$

où λ , t_{ts} et N_{pkt} représentent respectivement le nombre de paquets générés par seconde, le temps entre deux réveils et le nombre de paquets présents dans la mémoire tampon de la station au moment du réveil. Pour des raisons de simplification, la mémoire tampon est considérée comme pleine lorsque $N_{\text{pkt}} = 1$. La probabilité d'avoir au moins un paquet généré par au moins une station dans le réseau durant les temps d'écoute est obtenue par l'estimation de la fraction de temps qu'une station passe dans un des états de transmission durant un cycle de fonctionnement [180, 181]. Cette estimation est basée sur le fonctionnement d'une STA représenté sur les figures 4.12 et 4.13. Elle est obtenue par l'équation (4.26) :

$$\tau = \sum_{n=0}^{m+1} \frac{p_\lambda \cdot p_{b,st,tr}^n \cdot t_{\text{tx}}}{(1 - p_\lambda) \cdot t_{\text{sleep}} + p_\lambda \cdot (t_{\text{wu}} + t_{\text{ech}})}, \quad (4.26)$$

où t_{tx} et t_{ech} représentent respectivement le temps passé par la station dans un état de transmission et le délai moyen d'une session d'échange. Ce délai intègre les temps d'écoute du mécanisme CSMA/CA. t_{tx} et t_{ech} sont obtenus par les équations (4.27) et (4.28) :

$$t_{tx} = N_{tx,qos} \cdot t_{qos,10} + N_{tx,arp} \cdot t_{arp,10} + N_{rx,arp} \cdot t_{arp,10} + N_{rx,coap} \cdot \sum_{mcs=0}^{10} (p_{sta,mcs} \cdot t_{coap_{ack},mcs}) + N_{tx,coap} \cdot \sum_{mcs=0}^{10} (p_{sta,mcs} \cdot t_{coap_{post},mcs}), \quad (4.27)$$

$$t_{ech} = N_{tx,qos} \cdot D_{qos} + (N_{tx,arp} + N_{rx,arp}) \cdot D_{arp} + N_{tx,coap} \cdot D_{coap_{post}} + N_{rx,coap} \cdot D_{coap_{ack}}. \quad (4.28)$$

$N_{tx,tr}$, $N_{rx,tr}$ et D_{tr} représentent respectivement le nombre de trames échangées et le délai moyen de transmission de chaque trame. tr correspond au type de trame : qos, arp, coap_{post} ou coap_{ack}. Les valeurs de D_{tr} sont obtenues avec l'équation (4.29) :

$$D_{tr} = \sum_{n=0}^{m+1} \left[\left(n \cdot t_{eifs} + \mathbb{1}_{\{1,m+1\}}(n) \cdot \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\min(2^k \cdot W_0, W_M) - 1}{2} \cdot t_{slot} + n \cdot t_{f,tr} \right) + t_{s,tr} \right] \cdot p_{s,st,tr} \cdot p_{b,st,tr}^n + \left[(m+1) \cdot t_{eifs} + \sum_{k=0}^m \frac{\min(2^k \cdot W_0, W_M) - 1}{2} \cdot t_{slot} + (m+2) \cdot t_{f,tr} \right] \cdot p_{fa,st,tr}, \quad (4.29)$$

où $t_{s,tr}$ et $t_{f,tr}$ représentent la durée d'une tentative de transmission, se soldant respectivement par un succès ou un échec. La durée d'une tentative est obtenue par les équations (4.30) et (4.31) :

$$t_{s,tr} = \begin{cases} t_{aifs} + t_{tr,10} + t_{sifs} + t_{ack} + 2 \cdot t_{\sigma} & \text{si } tr = \text{arp ou qos,} \\ t_{aifs} + \sum_{mcs=0}^{10} (p_{sta,mcs} \cdot t_{tr,mcs}) + t_{sifs} + t_{ack} + 2 \cdot t_{\sigma} & \text{si } tr = \text{coap}_{post} \text{ ou } \text{coap}_{ack}, \end{cases} \quad (4.30)$$

$$t_{f,tr} = \begin{cases} t_{aifs} + t_{tr,10} + t_{\sigma} & \text{si } tr = \text{arp ou qos,} \\ t_{aifs} + \sum_{mcs=0}^{10} (p_{sta,mcs} \cdot t_{tr,mcs}) + t_{\sigma} & \text{si } tr = \text{coap}_{post} \text{ ou } \text{coap}_{ack}. \end{cases} \quad (4.31)$$

t_{σ} est la durée de propagation de la forme d'onde, égale à 6 μ s [101, 103, 107]. Les équations (4.15), (4.16) et (4.26) représentent un système non linéaire à trois inconnues $p_{b,st,tr}$, $p_{f,st}$ et τ . La solution est obtenue par itération, sachant que $\{p_{b,st,tr}, p_{f,st}, \tau\} \in [0, 1]^3$.

Validation du modèle de fonctionnement

Le modèle de fonctionnement décrit dans la partie 4.4.3 est validé à l’aide d’un simulateur développé sous Matlab. Ce simulateur s’appuie sur la *WLAN ToolBox* [182] que nous avons modifié pour intégrer et simuler des réseaux 802.11ah. La figure 4.14 représente la structure du simulateur qui est construit autour de différents blocs (ou classes d’objets).

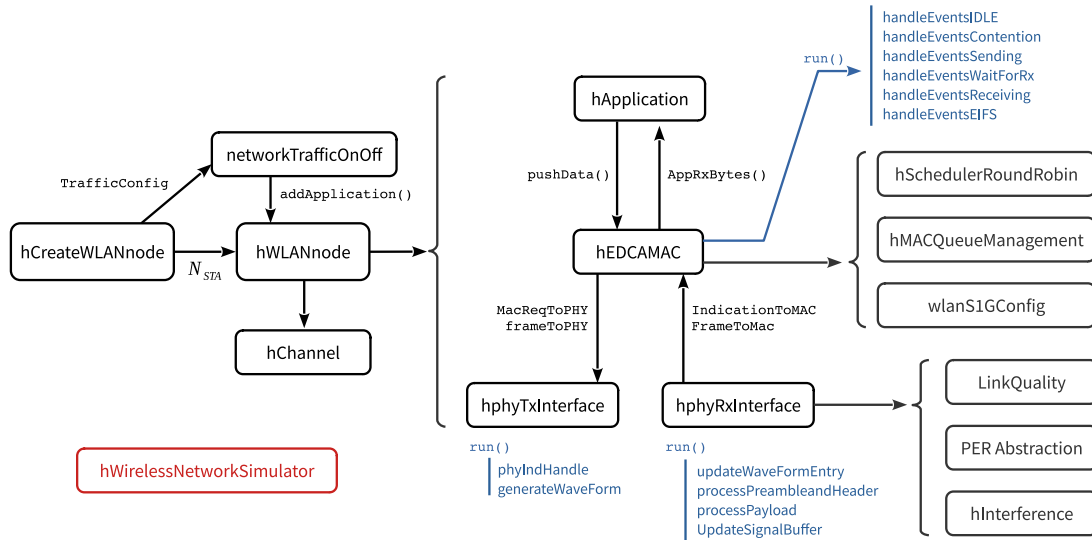


FIGURE 4.14 – Architecture du simulateur de réseau 802.11ah sous Matlab.

La classe `hCreateWLANNodes` permet de valider les paramètres de simulation et de configurer un réseau 802.11ah. Chaque nœud est construit avec la classe `hWLANNode`, auquel est affecté un trafic de données (`networkTrafficOnOff`) et un canal de transmission (`hChannel`). Les classes `hApplication`, `hEDCAMAC`, `hPhyRxInterface` et `hPhyTxInterface` assurent le fonctionnement des différentes couches de communication. La couche application génère des paquets de données et les transmet aux couches inférieures, en suivant une loi de *Poisson* d’intensité λ . La couche MAC exécute une machine d’état (`run()`) qui respecte les caractéristiques du mécanisme EDCA. La couche physique simule un émetteur et un récepteur. Elle intègre également les caractéristiques d’un canal de transmission. Ces couches fonctionnent indépendamment et communiquent entre elles par différents messages : `MacReqToPHY`, `frameToPHY`, `IndicationToMAC` et `FrameToMac`. Pour finir, la classe `hWirelessNetworkSimulator` permet de simuler le fonctionnement des différents éléments du réseau, de planifier ou d’annuler des événements, et d’extraire des métriques à la fin de la simulation. Nous avons modifié chaque bloc pour qu’il fonctionne avec les caractéristiques du protocole 802.11ah et plus spécifiquement les classes `networkTrafficOnOff` et `hWirelessNetworkSimulator` pour qu’elles génèrent des paquets de données en suivant une loi de *Poisson* pour les différentes STAs du réseau.

La simulation est configurée pour des transmissions à 863,5 MHz, un nombre de stations qui

varie entre 1 et 50, l'utilisation de différents MCS et un trafic en voie montante qui suit une loi de *Poisson* d'intensité λ . La figure 4.15 représente la probabilité de transmettre une trame de données avec succès en fonction du nombre de stations présentes dans le réseau. Le MCS est configuré à 7 et le temps moyen entre la génération de deux trames consécutives varie entre 0,035 et 1 s. Les résultats de simulation correspondent à la moyenne d'une dizaine d'essais.

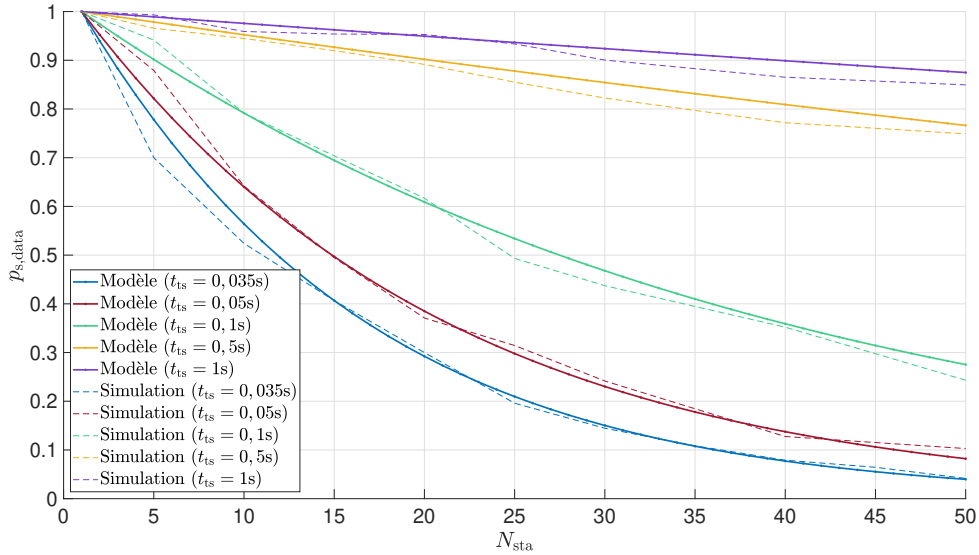


FIGURE 4.15 – Probabilité de transmettre une trame avec succès en fonction du nombre de station dans le réseau et pour différentes intensités de trafic (MSDU = 351 octets; $m = 1$; $P_{ta} = 14$ dBm; BW = 1 MHz).

Le modèle analytique est validé par la simulation, avec une erreur maximale de 3,5% entre les différentes courbes. Lorsque le réseau est composé d'un seul capteur, la probabilité de transmission avec succès est égale à 100%. Elle diminue de manière exponentielle avec l'augmentation du nombre de stations dans le réseau. Avec 25 stations et une transmission réalisée toutes les secondes, la probabilité de succès est de 93,5%. Elle descend à 87,5% lorsqu'il y a 50 stations. Avec des transmissions réalisées toutes les 0,05 s, la probabilité de transmission avec succès est égale à 29,8% pour 25 stations et 8,2% lorsqu'il y a 50 stations.

4.4.4 Modélisation de l'énergie consommée par une station 802.11ah

Énergie consommée pendant une transmission

Pour déterminer l'énergie moyenne consommée par une station lors d'une transmission, il faut estimer le nombre de visites et l'énergie consommée par la station dans chaque état modélisé par la chaîne de Markov absorbante. La consommation moyenne d'énergie est obtenue avec l'équation (4.32) :

$$\overline{e_{r_q}} = n_{c_q} \cdot e_{r_q}, \quad (4.32)$$

où e_{r_q} est un vecteur qui contient l'énergie consommée dans les différents états transitoires de la chaîne de Markov absorbante, et n_{c_q} est le vecteur qui représente les opérations du protocole de couche MAC. Le résultat décrit dans l'équation (4.33) est obtenu à partir de l'équation (4.32) :

$$\overline{E}_{st,tr} = E_{st,-1} + \sum_{n=0}^m p_{b,st,tr}^{n+1} \cdot \left(E_{st,n} + \sum_{k=1}^{2^n W_0 - 1} \frac{k}{2^n \cdot W_0} \cdot \left(E_{slot} + \frac{p_{f,st}}{1 - p_{f,st}} \cdot E_f \right) \right), \quad (4.33)$$

où $\overline{E}_{st,tr}$, $E_{st,-1}$, $E_{st,n}$, E_{slot} et E_f représentent respectivement l'énergie moyenne consommée par la station pour transmettre une trame tr et l'énergie consommée par la station dans les différents états de la chaîne de Markov. L'énergie consommée par la station dans les différents états où une tentative de transmission est réalisée ($b_{n,0}$ avec $n \in [-1, m]$) est obtenue par l'équation (4.34) :

$$E_{st,-1} = E_{st,n} = p_{b,st,tr} \cdot (E_{c,st,mcs} + E_{eifs}) + (1 - p_{b,st,tr}) \cdot E_{s,st,mcs}, \quad (4.34)$$

où $E_{c,st,mcs}$ et $E_{s,st,mcs}$ correspondent respectivement à l'énergie consommée en cas d'échec ou de succès de la transmission. E_{eifs} est l'énergie consommée pendant la période EIFS. Les valeurs de $E_{s,st,mcs}$, $E_{c,st,mcs}$ et E_{eifs} sont calculées à l'aide des équations (4.35), (4.36) et (4.37) :

$$E_{s,st,mcs} = \begin{cases} V_{sta} \cdot [I_{rx} \cdot (t_{aifs} + t_{tr,mcs} + t_{sifs} + t_\sigma) + I_{tx} \cdot (t_{ack} + t_\sigma)] & \text{si } st = rx \\ & \text{et } tr \in [coap_{ack}, arp], \\ V_{sta} \cdot [I_{rx} \cdot (t_{aifs} + t_{sifs} + t_{ack} + t_\sigma) + I_{tx} \cdot (t_{tr,mcs} + t_\sigma)] & \text{si } st = tx \\ & \text{et } tr \in [coap_{post}, qos, arp], \end{cases} \quad (4.35)$$

$$E_{c,st,mcs} = \begin{cases} V_{sta} \cdot I_{rx} \cdot (t_{aifs} + t_{tr,mcs} + t_\sigma) & \text{si } tr \in [coap_{ack}, arp] \text{ et } st = rx, \\ V_{sta} \cdot [I_{rx} \cdot t_{aifs} + I_{tx} \cdot (t_{tr,mcs} + t_\sigma)] & \text{si } tr \in [coap_{post}, qos, arp] \text{ et } st = tx, \end{cases} \quad (4.36)$$

$$E_{eifs} = V_{sta} \cdot I_{rx} \cdot t_{eifs}, \quad (4.37)$$

où V_{sta} , I_{tx} et I_{rx} correspondent respectivement à la tension et aux courants consommés par le dispositif en émission et en réception. t_{eifs} , t_{aifs} et t_{sifs} sont détaillés dans le tableau 2.10. L'énergie consommée dans les états notés de $b_{0,1}$ à b_{m,W_m-1} est obtenue par l'équation (4.38) :

$$E_{slot} = V_{sta} \cdot I_{rx} \cdot t_{slot}, \quad (4.38)$$

et l'énergie consommée dans les états notés de $b_{0,F}$ à $b_{m,F}$, est obtenue par l'équation (4.39) :

$$E_f = \sum_{mcs=0}^{10} (p_{e_{sta},mcs} \cdot E_{e_{tx},mcs} + p_{h_{sta},mcs} \cdot E_{h_{tx},mcs}), \quad (4.39)$$

où $E_{e_{tx},mcs}$ et $E_{h_{tx},mcs}$ représentent l'énergie consommée par la station lorsqu'une autre station a obtenu le média, et que le compteur de contention est figé. Les valeurs de $E_{e_{tx},mcs}$ et $E_{h_{tx},mcs}$ sont obtenues par les équations (4.40) et (4.41) :

$$E_{e_{tx},mcs} = V_{sta} \cdot I_{rx} \cdot \overline{t_{s,tr}}, \quad (4.40)$$

$$E_{h_{tx},mcs} = V_{sta} \cdot I_{rx} \cdot (t_{ack} + t_{\sigma}). \quad (4.41)$$

$E_{e_{tx},mcs}$ est l'énergie consommée par la station lorsqu'elle fige son compteur de contention pour la transmission complète d'une station exposée et $E_{h_{tx},mcs}$ est l'énergie consommée par la station lorsqu'elle fige son compteur de contention du fait de la transmission d'un ACK de l'AP vers une station cachée.

Énergie consommée par une station lors d'une phase de réveil

A partir des précédentes équations (4.33) à (4.41), il est possible de déterminer l'énergie moyenne consommée par une station 802.11ah lors d'une phase de réveil, par l'équation (4.42) :

$$\begin{aligned} \overline{E}_{tot} = & E_{wu} + N_{tx,qos} \cdot \overline{E}_{tx,qos} + N_{tx,arp} \cdot \overline{E}_{tx,arp} \\ & + N_{rx,arp} \cdot \overline{E}_{rx,arp} + N_{tx,coap} \cdot \overline{E}_{tx,coap} + N_{rx,coap} \cdot \overline{E}_{rx,coap}, \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$p_s = p_{s,tx,qos}^{N_{tx,qos}} \cdot p_{s,tx,arp}^{N_{tx,arp}} \cdot p_{s,rx,arp}^{N_{rx,arp}} \cdot p_{s,tx,coap}^{N_{tx,coap}} \cdot p_{s,rx,coap}^{N_{rx,coap}} \quad (4.43)$$

où \overline{E}_{tot} est l'énergie moyenne consommée par une station lors d'une phase de réveil. \overline{E}_{tot} est égale à la somme des énergies consommées dans les différents états de fonctionnement. Si on considère le fonctionnement représenté sur la figure 4.12, E_{wu} est obtenu à partir de l'équation (4.3) et des valeurs contenues dans le tableau 4.1. Les valeurs de $N_{tx,tr}$ et $N_{rx,tr}$ sont définies dans le tableau 4.2 et les valeurs de l'énergie consommée dans chaque état de transmission sont obtenues à partir des équations (4.33) à (4.41).

4.4.5 Analyse de l'énergie consommée par une station 802.11ah

Dans le modèle de consommation énergétique, l'équation (4.11) permet de déterminer la puissance de transmission et le MCS utilisé par la STA, en fonction de la distance qui la sépare

de l'AP. Le nombre de stations exposées et cachées est ensuite calculé à partir de cette distance et pour chaque MCS, à l'aide des équations (4.12), (4.13) et de l'annexe B. Les probabilités d'erreur et de collision, ainsi que le nombre de paquets générés par seconde, par station et par MCS sont ensuite déterminés avec les équations (4.15), (4.16), (4.24), (4.25) et (4.26). Enfin, les équations (4.33) à (4.41) et l'équation (4.42) permettent de calculer l'énergie moyenne consommée par une station lors d'une phase de transmission, en faisant varier différents paramètres d'entrée :

- la puissance de transmission de la station 802.11ah,
- la charge utile transportée dans les trames de données CoAP,
- le nombre de tentatives de transmissions autorisées,
- la distance entre la station 802.11ah et l'AP,
- et la durée du cycle de service.

Pour les résultats proposés ci-dessous, on considère que l'indice d'affaiblissement de propagation γ est égale à 3 (4.11), que toutes les stations du réseau fonctionnent avec une catégorie de QoS AC_BE (tableau 2.10) et qu'elles transmettent avec le même cycle de service, des données encapsulées dans un paquet CoAP. Le modèle analytique présenté ci-dessus correspond à la consommation moyenne d'énergie d'une station. La consommation moyenne d'énergie par bit utile transmis est définie par $\bar{E}_{\text{bit}} = \frac{\bar{E}_{\text{tot}}}{8 \cdot N_{\text{DATA}}}$.

Les figures 4.16 et 4.17 représentent l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah (en trait plein) en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes puissances de transmission. Le nombre de tentatives maximum autorisées est fixé à cinq et la charge utile à 165 octets. Les stations génèrent en moyenne un paquet toutes les 30 s, la distance est de 150 m et la puissance de transmission varie entre 0 et 14 dBm. Le mécanisme RTS/CTS n'est pas utilisé sur la figure 4.16 et il est utilisé sur la figure 4.17. La valeur de la probabilité de transmission avec succès est indiquée sur l'axe des ordonnées de droite et la valeur de l'énergie sur l'axe des ordonnées de gauche.

L'énergie moyenne consommée par bit utile augmente avec le nombre de stations présentes dans le réseau. Lorsqu'il n'y a qu'une seule station, la probabilité de succès est proche de 1. La station effectue alors une seule tentative de transmission et consomme une énergie d'environ 0,18 mJ par bit utile transmis. Sur la figure 4.16, lorsque le nombre de stations dépasse 50 pour une puissance de 0 dBm et 200 pour une puissance de 14 dBm, la probabilité de succès est proche de 0%. A partir de cette limite, le nombre de collisions est trop élevé, notamment avec les stations cachées, et le dispositif utilise le nombre maximum de retransmissions autorisées sans parvenir à transmettre les données. L'énergie consommée par bit utile transmis par la station 802.11ah diminue également avec l'augmentation de la puissance de transmission. Avec 20 nœuds dans le réseau, la station consomme 0,2 mJ/bit utile à 0 dBm et 0,175 mJ/bit utile à 14 dBm. Avec 100 nœuds dans le réseau, la station consomme 0,24 mJ/bit utile à 0 dBm et 0,18 mJ/bit utile à

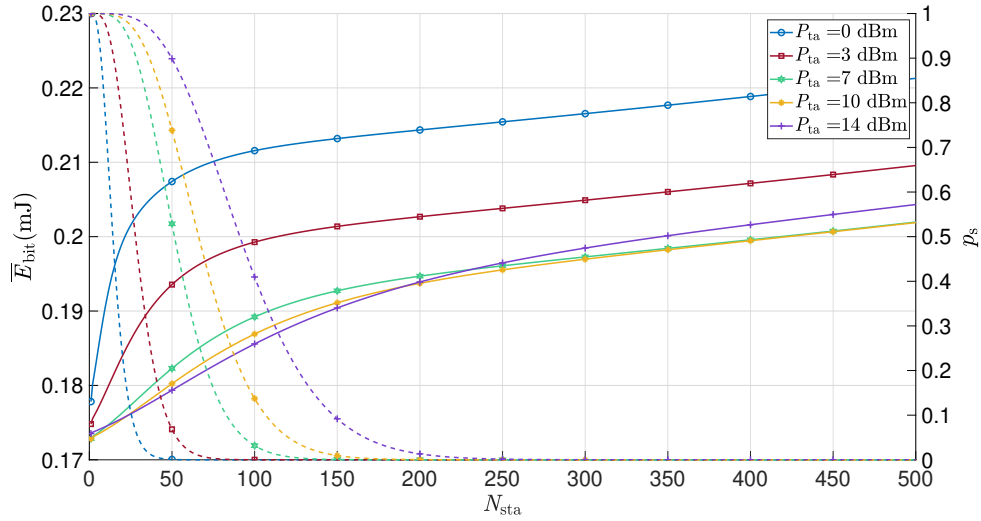


FIGURE 4.16 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes puissances de transmission (sans RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $m = 3$; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $t_{\text{ts}} = 30$ s).

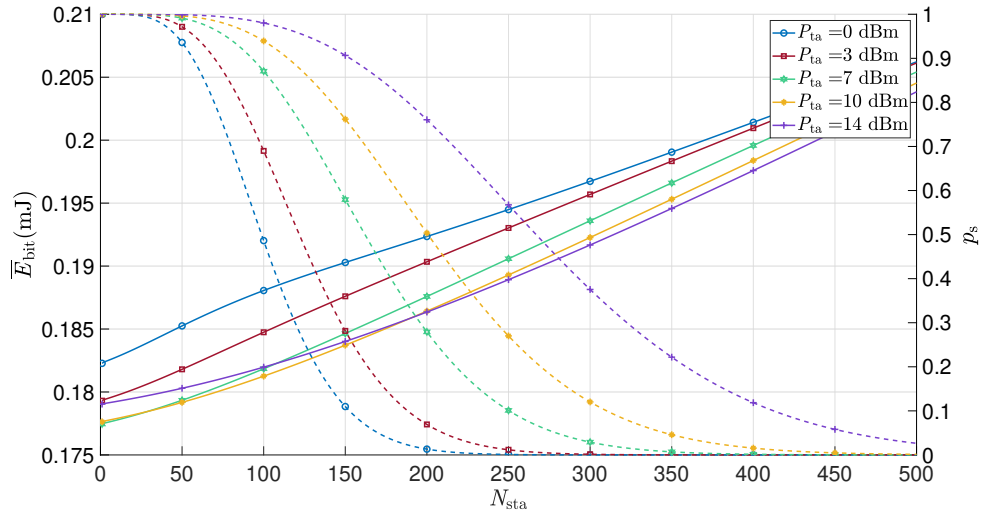


FIGURE 4.17 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes puissances de transmission (avec RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $m = 3$; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $t_{\text{ts}} = 30$ s).

14 dBm. Lorsque la puissance diminue, le nombre de stations cachées augmente, ce qui a pour effet d'augmenter le nombre de collisions et donc l'énergie consommée. Comme on peut le voir sur la figure 4.17, l'utilisation du mécanisme RTS/CTS améliore la probabilité de transmission avec succès, ce qui a pour effet de diminuer la consommation d'énergie par bit utile. Avec 20 nœuds dans le réseau, la station consomme 0,183 mJ/bit utile à 0 dBm et 0,179 mJ/bit utile

à 14 dBm. Avec 100 nœuds dans le réseau, la station consomme 0,187 mJ/bit utile à 0 dBm et 0,181 mJ/bit utile à 14 dBm. La puissance de transmission est un paramètre important à prendre en compte, en parallèle de l'utilisation du mécanisme RTS/CTS, du nombre et de la disposition des autres stations du réseau.

Les figures 4.18 et 4.19 représentent l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah (en trait plein) en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes valeurs de charge transportée dans les trames de données. La puissance de transmission est fixée à 14 dBm, le nombre de retransmissions à cinq, la distance entre la station et l'AP est de 150 m, le cycle de service est fixé à 30 s et la charge utile varie entre 50 et 350 octets. Le mécanisme RTS/CTS n'est pas utilisé sur la figure 4.18 et il est utilisé sur la figure 4.19. La valeur de la probabilité de transmission avec succès est indiquée sur l'axe des ordonnées de droite et la valeur de l'énergie sur l'axe des ordonnées de gauche.

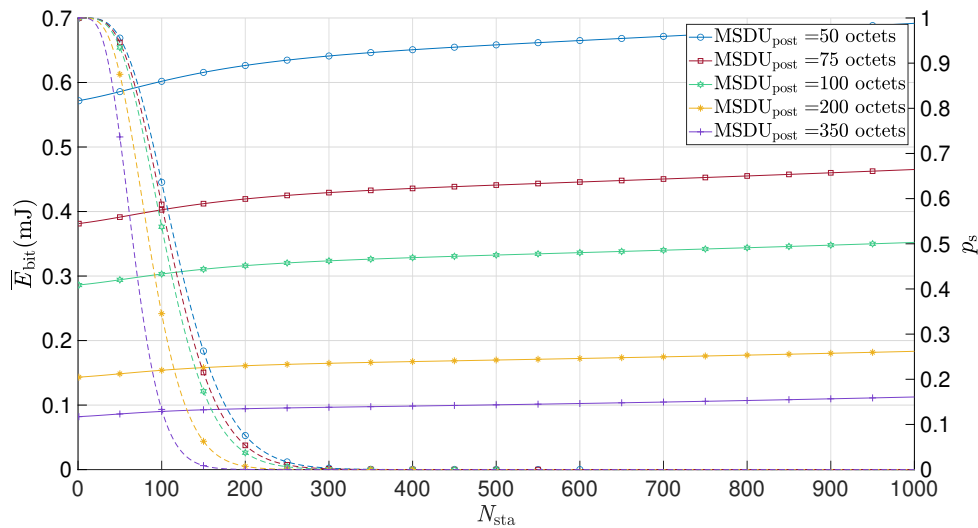


FIGURE 4.18 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes valeurs de charge utile (sans RTS/CTS ; $m = 3$; $P_{ta} = 14$ dBm ; $d_{sta} = 150$ m ; $t_{ts} = 30$ s).

L'énergie consommée par bit utile augmente avec le nombre de stations présentes dans le réseau. Elle évolue également en fonction de la charge utile, dans un rapport d'un septième entre une charge de 50 et une charge de 350 octets. L'augmentation de la charge utile réduit la quantité d'énergie consommée par bit utile mais augmente d'autant le temps de transmission, et donc la surface de vulnérabilité aux transmissions des stations cachées. Sur la figure 4.18, la probabilité de succès est proche de 0% lorsque le nombre de stations dépasse les 150 dispositifs. Sur la figure 4.19, la probabilité de succès est proche de 0% lorsque le nombre de stations dépasse les 550 dispositifs. L'utilisation du mécanisme RTS/CTS a peu d'impact sur l'énergie consommée

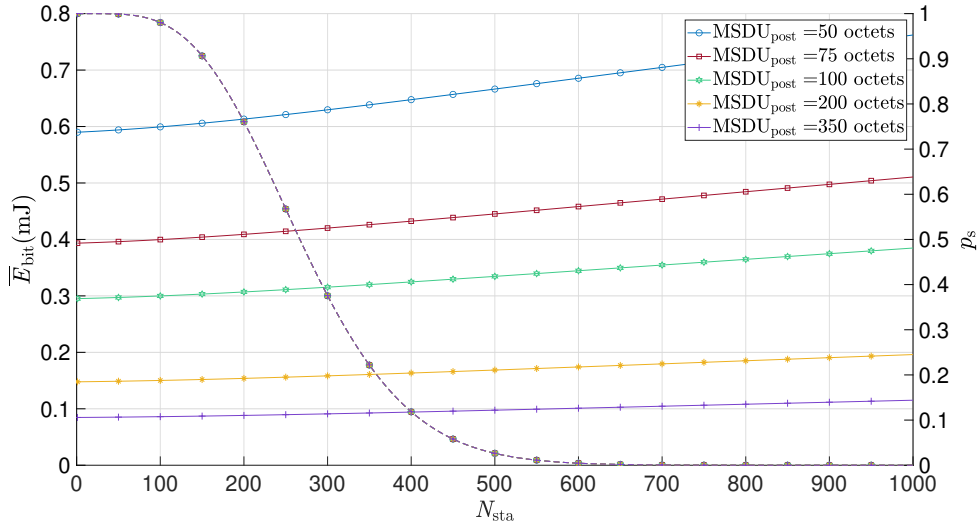


FIGURE 4.19 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes valeurs de charge utile (avec RTS/CTS ; $m = 3$; $P_{ta} = 14$ dBm ; $d_{sta} = 150$ m ; $t_{ts} = 30$ s).

par une station proche de l'AP, mais elle améliore grandement la probabilité de transmission avec succès. L'augmentation de la charge utile associée à l'utilisation du mécanisme RTS/CTS permet donc d'améliorer d'une part la consommation énergétique et d'autre part la probabilité de transmission avec succès.

Les figures 4.20 et 4.21 représentent l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah (en trait plein) en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes tentatives de transmission autorisées. La charge utile est fixée à 165 octets, la puissance d'émission à 14 dBm, le cycle de service à 30 s et le nombre de tentatives maximum autorisées ($m + 2$) varie entre trois et sept ($m \in [1, 5]$). Le mécanisme RTS/CTS n'est pas utilisé sur la figure 4.20 et il est utilisé sur la figure 4.21. La valeur de la probabilité de transmission avec succès est indiquée sur l'axe des ordonnées de droite et la valeur de l'énergie sur l'axe des ordonnées de gauche.

La probabilité de transmission avec succès et l'énergie consommée évoluent avec le nombre de tentatives autorisées et le nombre de stations présentes dans le réseau. Le nombre de tentatives a un impact faible sur l'énergie consommée lorsque la probabilité de transmission avec succès est proche de 1 et un impact important lorsque cette probabilité est proche de 0. Sur la figure 4.20, on observe que pour trois tentatives, la probabilité de transmission avec succès est supérieure à 90% lorsqu'il y a moins de 20 stations dans le réseau. Pour sept tentatives, elle est supérieure à 90% lorsqu'il y a moins de 60 stations. Avec 20 stations dans le réseau, l'énergie consommée est égale à 0,17 mJ/bit utile. Avec 60 stations, l'énergie consommée est égale à 0,176 mJ/bit utile pour trois tentatives et 0,179 mJ/bit utile pour sept tentatives. Lorsqu'il y a environ 200 stations dans

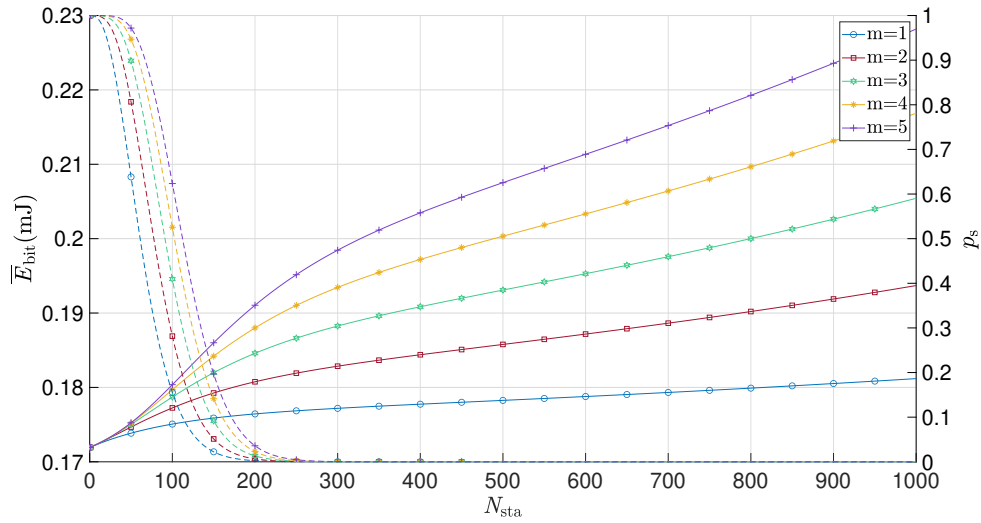


FIGURE 4.20 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes tentatives autorisées (sans RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $P_{ta} = 14$ dBm ; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $t_{ts} = 30$ s).

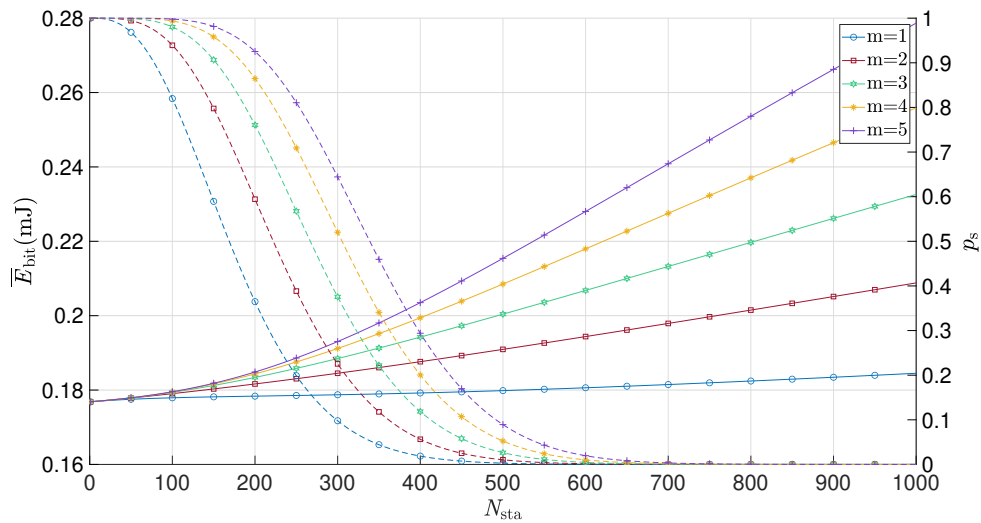


FIGURE 4.21 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes tentatives autorisées (avec RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $P_{ta} = 14$ dBm ; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $t_{ts} = 30$ s).

le réseau, la probabilité de transmission avec succès est égale à 0% et l'énergie consommée par bit utile est égale à 0,177 mJ pour trois tentatives et 0,198 mJ pour sept tentatives. Sur la figure 4.21, on remarque que le mécanisme RTS/CTS améliore la probabilité de transmission avec succès et l'énergie consommée par bit utile. Le nombre de stations fait diminuer la probabilité de succès et augmente la surface de contention qui à son tour fait augmenter la consommation énergétique proportionnellement au nombre de tentatives. Avec le mécanisme RTS/CTS, la probabilité est

meilleure. Elle est égale à 0% au delà des 400 stations. L'énergie consommée par bit utile diminue car la station transmet une trame RTS moins gourmande en énergie avant d'envoyer sa trame de données. Le risque de collision d'une trame RTS avec les stations cachées est plus faible qu'avec une trame de données.

Les figures 4.22 et 4.23 représentent l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah (en trait plein) en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes distances séparant la station et l'AP. Le MCS varie en fonction de la distance, la charge utile est fixée à 165 octets, la puissance à 14 dBm, le nombre de tentatives à cinq et le cycle de service à 30 s. Le mécanisme RTS/CTS n'est pas utilisé sur la figure 4.22 et il est utilisé sur la figure 4.23. La valeur de la probabilité de transmission avec succès est indiquée sur l'axe des ordonnées de droite et la valeur de l'énergie sur l'axe des ordonnées de gauche.

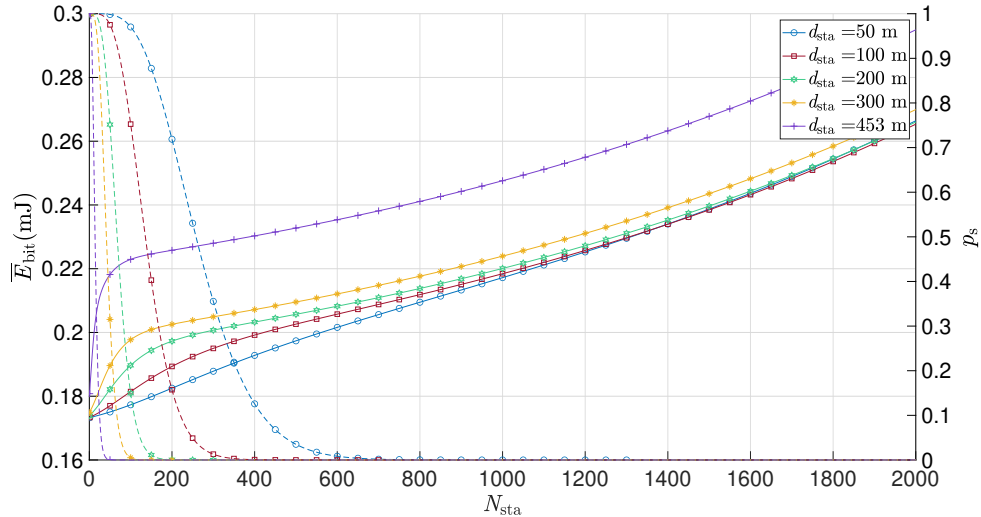


FIGURE 4.22 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes valeurs de distances (sans RTS/CTS; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets; $P_{\text{ta}} = 14$ dBm; $m = 5$; $t_{\text{ts}} = 30$ s).

Sur ces figures, on retrouve la même évolution que précédemment. L'énergie consommée par bit utile et la probabilité de succès évoluent avec la distance qui sépare la station de l'AP. Les raisons sont similaires à celles évoquées pour la puissance. Avec la distance, le nombre de stations cachées augmentent et la probabilité de transmission avec succès diminue, ce qui fait augmenter la consommation d'énergie. Sur la figure 4.22, avec 50 stations dans le réseau, la probabilité de transmission avec succès d'une station située à 450 m est égale à 0% et celle d'une station à 100 m est égale à 99%. L'énergie consommée est égale à 0,175 mJ/bit utile transmis dans une configuration avec une station à 100 m et 0,221 mJ/bit utile pour une station à 450 m. Sur la figure 4.23, avec 50 stations dans le réseau, la probabilité est proche de 100% quelque

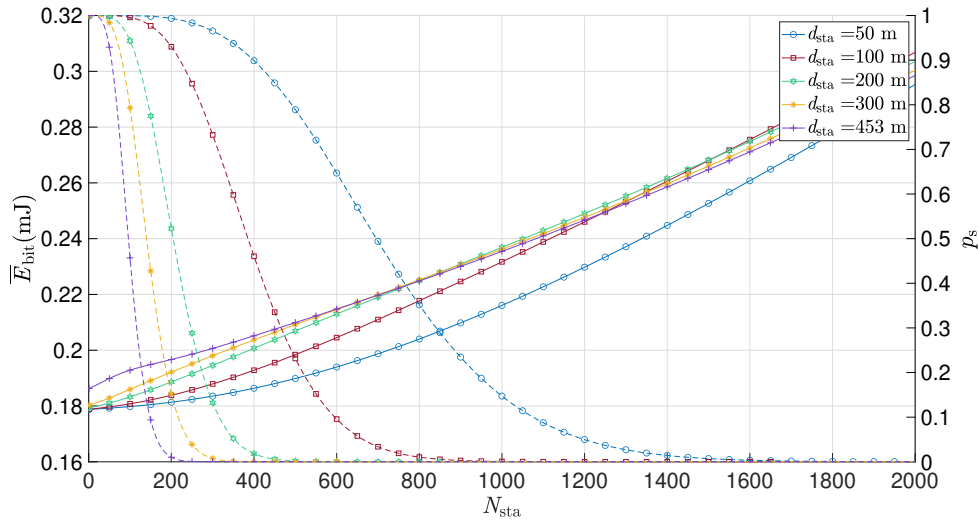


FIGURE 4.23 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différentes valeurs de distances (avec RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $P_{\text{ta}} = 14$ dBm ; $m = 3$; $t_{\text{ts}} = 30$ s).

soit la distance. L'énergie consommée est égale à 0,179 mJ/bit utile pour la station à 100 m et 0,189 mJ/bit utile pour la station à 450 m. La consommation d'énergie est donc directement liée à la probabilité de succès et le mécanisme RTS/CTS diminue fortement les collisions, surtout pour les stations les plus éloignées.

Les figures 4.24 et 4.25 représentent l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile transmis pour une station 802.11ah (en trait plein) en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différents cycles de service. Le nombre de tentatives maximum autorisées est fixé à cinq, la charge utile à 165 octets, la distance à 150 m et la puissance est de 14 dBm. Le cycle de service varie entre 30 et 100 s. Le mécanisme RTS/CTS n'est pas utilisé sur la figure 4.24 et il est utilisé sur la figure 4.25. La valeur de la probabilité de transmission avec succès est indiquée sur l'axe des ordonnées de droite et la valeur de l'énergie sur l'axe des ordonnées de gauche.

Une nouvelle fois, on constate que l'énergie consommée par un dispositif augmente avec le nombre de stations présentes dans le réseau. La consommation d'énergie évolue avec la probabilité de succès. Lorsque le cycle de service augmente, la charge du réseau (τ) diminue, la probabilité de transmission avec succès augmente et la consommation d'énergie diminue. Sur la figure 4.24, lorsqu'il y a 50 stations dans le réseau, l'énergie consommée est égale à 0,173 mJ/bit utile pour un cycle de 30 s et 0,176 mJ/bit utile pour un cycle de 100 s, avec des probabilités de transmission égales à 99% et 83%, respectivement. Lorsqu'il y a 300 stations, l'énergie consommée est égale à 0,18 mJ/bit utile pour un cycle de 30 s et 0,193 mJ/bit utile pour un cycle de 100 s, mais les probabilités de transmission sont inférieures à 40%. Sur la figure 4.25,

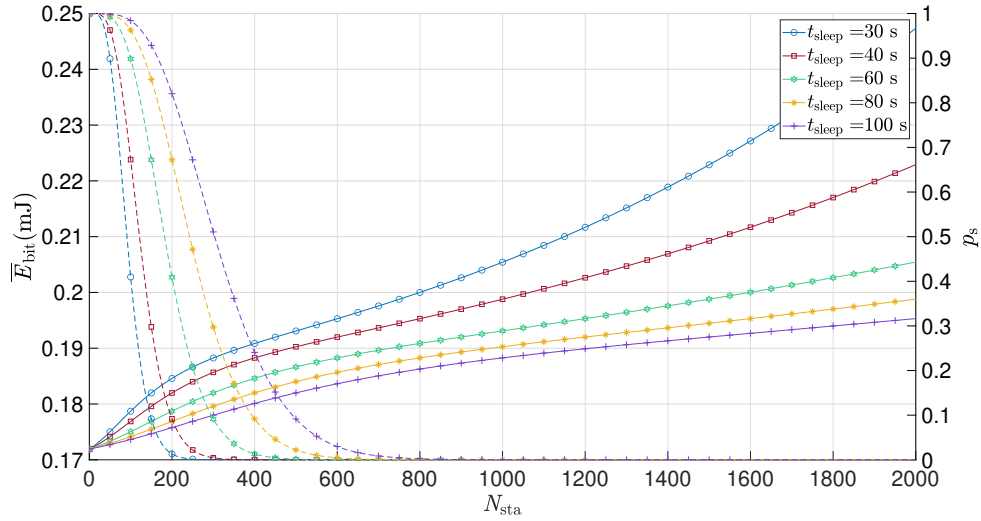


FIGURE 4.24 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différents cycles de service (sans RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $P_{\text{ta}} = 14$ dBm ; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $m = 5$).

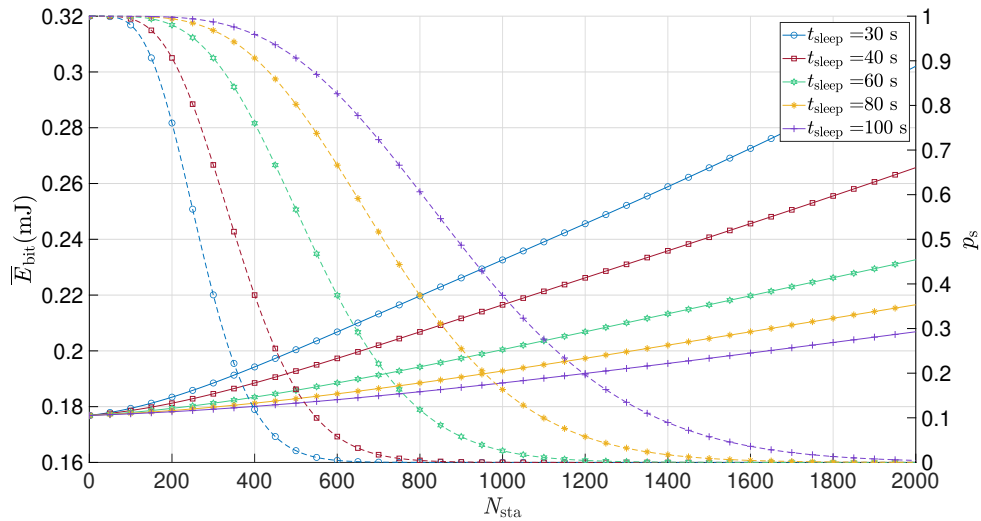


FIGURE 4.25 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par une station 802.11ah en fonction du nombre de stations dans le réseau et pour différents cycles de service (avec RTS/CTS ; $\text{MSDU}_{\text{post}} = 165$ octets ; $P_{\text{ta}} = 14$ dBm ; $d_{\text{sta}} = 150$ m ; $m = 5$).

lorsqu'il y a 50 stations dans le réseau, l'énergie consommée est égale à 0,177 mJ/bit utile pour un cycle de 30 s et un cycle de 100 s, avec des probabilités de transmission égales à 100%. Lorsqu'il y a 300 stations, l'énergie consommée est égale à 0,188 mJ/bit utile pour un cycle de 30 s et 0,179 mJ/bit utile pour un cycle de 100 s, et les probabilités de transmission sont égales à 37% et 99%, respectivement. Le nombre de stations en contention a un impact important sur la charge du réseau et donc sur la consommation énergétique de la station. Le mécanisme RTS/CTS

améliore grandement la probabilité de transmission, et donc la consommation énergétique.

4.5 Discussions et conclusion

Les résultats précédents peuvent être mis en perspective afin d'ouvrir la discussion sur l'optimisation de la consommation énergétique d'une station 802.11ah. L'accès au média est organisé de manière temporelle et les limites sont principalement liées au nombre de stations présentes dans le réseau. Pour pallier ce problème, la norme propose différentes solutions : le mécanisme de protection des collisions RTS/CTS qui est directement intégré dans le mécanisme DCF/EDCA, et les mécanismes d'économie d'énergie TIM, RAW et TWT. Le DCF/EDCA doit obligatoirement être implémenté dans un dispositif 802.11ah, en revanche le RAW et le TWT sont optionnels.

Avec le mécanisme DCF/EDCA, le principal problème concerne les stations cachées qui font augmenter la probabilité de collisions et l'énergie consommée dans les différentes tentatives. Pour limiter leurs impacts, les stations du réseau doivent transmettre à la puissance maximale autorisée (figure 4.16) afin de se rendre visible auprès des autres stations du réseau. Elles peuvent également augmenter la taille de la charge utile (figure 4.18), et ainsi limiter le nombre de réveils, ce qui aura pour effet de diminuer la charge du réseau (figure 4.24). Enfin, les stations les plus éloignées, qui sont également celles qui sont le plus soumises aux collisions, peuvent utiliser le mécanisme RTS/CTS (figures 4.17, 4.19, 4.23 et 4.25) et augmenter le nombre de répétitions (figures 4.20 et 4.21) afin de maximiser leurs probabilités de transmettre avec succès.

Les mécanismes RAW et TWT permettent de regrouper les stations en fonction de leur besoin et d'ajuster précisément les paramètres de transmission. La figure 4.10 représente l'énergie consommée par une station lorsqu'elle se retrouve seule à accéder au média, ce qui est le cas si elle est protégée par l'AP dans un créneau RAW ou TWT. Dans cette situation, l'énergie consommée est minimale et vaut 0,17 mJ/bit utile pour une charge de 165 octets. Cette consommation varie principalement en fonction de la charge et de la puissance de transmission. A 0 dBm, pour une charge de 50 octets, l'énergie est égale à 0,75 mJ/bit utile transmis. A 23 dBm, pour une charge de 350 octets, elle est inférieure à 0,1 mJ/bit utile (figure 4.9 et 4.10).

Le nombre de stations dans un groupe RAW ou TWT dépend principalement de la probabilité de succès. Lorsque la station se situe à moins de 50 m, elle peut être mise en concurrence avec 75 stations pour une probabilité de succès supérieure à 98%. Lorsqu'elle se situe à 450 m, elle peut être mise en concurrence avec moins de cinq stations (figure 4.22). De la même manière, un cycle de service de 30 s autorisera le regroupement de 30 stations, là où un cycle de service de 100 s autorisera le regroupement de 90 stations (figure 4.24). Pour être optimal, le regroupement doit favoriser la distribution géographique et minimiser les stations cachées. L'utilisation d'antennes directives semble être la solution la plus adaptée.

L'utilisation des mécanismes TWT et RAW permet d'offrir à chaque station un accès équitable au média, sans collision. Cependant, pour que ces mécanismes fonctionnent correctement, l'AP doit connaître les besoins de chaque station et les STAs doivent être correctement synchronisées. Ainsi la STA initie la demande, en fonction de ses besoins et l'AP offre la synchronisation en diffusant sa minuterie TSF (*Time Synchronization Function*) dans le champ d'horodatage de chaque trame balise TIM. Le besoin de synchronisation est l'une des principales raisons pour lesquelles les STAs doivent se réveiller périodiquement et écouter les balises TIM. Ce réveil a un impact non négligeable sur la consommation d'énergie et doit être optimisé en fonction de la capacité de l'équipement à rester synchronisé (tableau 4.7).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une étude et une modélisation de la consommation énergétique d'une station 802.11ah. Nous avons qualifié l'efficacité énergétique de la norme en utilisant le seul matériel actuellement disponible sur le marché. Ce matériel n'intègre pas tous les mécanismes d'économie d'énergie. Néanmoins, nos mesures démontrent la faisabilité de l'utilisation du protocole 802.11ah comme technologie IoT, avec une durée de vie qui peut atteindre plusieurs années. La modélisation est basée sur ces mesures, et le banc de test intègre tous les éléments d'un réseau IoT. Les résultats permettent de caractériser la consommation d'énergie d'une station et le temps passé dans chaque étape de communication. Le modèle est affiné par la prise en compte de l'environnement, des différentes couches de communications, des différents paramètres de transmission, et de la distribution géographique des stations du réseau.

Les résultats montrent l'influence du nombre de stations dans le réseau sur la consommation d'énergie. La puissance de transmission, la charge utile, le nombre de retransmissions, la distance et le cycle de service sont également prépondérants. Dans tous les cas, l'énergie consommée par bit utile atteint une limite qui dépend du nombre total de stations dans le réseau. Cela nous permet de démontrer que la mise à l'échelle d'un réseau 802.11ah ne se fera pas sans l'utilisation des mécanismes de protection RTS/CTS et des mécanismes d'économie d'énergie RAW et TWT.

MESURES ET MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DU PROTOCOLE LoRa

Introduction

Dans ce chapitre, nous considérons la technologie LoRa, qui représente un exemple de solution LPWAN fonctionnant avec une densité de capteurs forte voire critique. Lorsque le nombre de capteurs augmente, l'énergie consommée par un capteur s'accroît également réduisant ainsi sa durée de vie. L'objectif de ce chapitre est d'étudier et de modéliser la consommation énergétique d'un nœud LoRa/LoRaWAN dans son environnement. Cette étude va permettre de détailler les paramètres de transmission qui ont un impact sur la consommation, de déterminer les limites énergétiques de cette technologie, et de la comparer avec l'efficacité énergétique du protocole 802.11ah.

Le chapitre est organisé de la manière suivante. Après une description des protocoles LoRa et LoRaWAN, des mesures de consommation énergétique sont réalisées à l'aide d'un banc d'essai. Les résultats permettent de caractériser l'énergie consommée et le temps passé par un capteur à chaque étape d'une communication LoRaWAN. A partir de ces mesures, un modèle affiné de consommation énergétique est élaboré. Il prend en compte le nombre de capteurs présents dans le réseau, la probabilité de collision qui dépend de la densité de capteurs, le taux d'erreur de transmission et le nombre de retransmissions autorisées. Le modèle permet d'appréhender les paramètres de transmission afin d'avoir une vision critériée de la consommation énergétique du protocole LoRa/LoRaWAN.

5.1 État de l'art

5.1.1 Généralités sur le protocole LoRa

La technologie LoRa/LoRaWAN est très présente dans les produits industriels. Cette solution a largement été étudiée et analysée afin de valider des cas d'utilisation, de vérifier les limites de fonctionnement ou de proposer des pistes d'amélioration [183-186]. Dans l'article [13], les performances d'un réseau LoRa/LoRaWAN sont mesurées afin d'étudier la qualité de service

en fonction du PER, du RSSI et du SNR. L'article [187] met en évidence les 6720 combinaisons possibles des caractéristiques de transmission du protocole LoRa et propose un algorithme afin de maximiser ses performances. Dans l'article [188], les paramètres de transmission sont également étudiés pour déterminer le débit et la durée des transmissions. La portée maximale d'un signal modulé en LoRa est mesurée dans [189] pour des capteurs fixes et mobiles. L'article [190] définit le nombre maximal de capteurs et leur répartition spatiale autour d'une passerelle LoRa. Dans l'article [191], un capteur LoRa autonome est développé afin de mesurer l'efficacité d'une transmission dans différentes situations. Enfin, les références [192-194] comparent la solution LoRa à d'autres technologies, et mettent en évidence ses avantages et ses inconvénients. Toutes ces études valident l'utilisation du protocole LoRa dans les applications IoT et le fait que les caractéristiques de transmission ont un impact significatif sur le comportement et la fiabilité du réseau. De nombreuses autres études ont été menées sur la technologie LoRa ou les solutions LPWAN en général. Les articles [91, 94, 98] proposent un état de l'art et discutent des futurs défis en matière de recherche.

5.1.2 Travaux portant sur la consommation énergétique du protocole LoRa

La consommation énergétique a également été abordée de manière significative dans la littérature. La référence [195] présente un modèle énergétique dans lequel la consommation de chaque élément d'un capteur a été étudiée, avec pour objectif de choisir les paramètres de transmission qui permettraient d'atteindre l'autonomie énergétique. Cependant, ce modèle est trop simple et ne prend pas en compte les erreurs de transmission et les collisions qui dépendent de la densité de capteurs dans le réseau. Une chaîne de Markov est utilisée dans l'article [196] pour modéliser la consommation et l'optimisation d'un nœud LoRa alimenté par une source d'énergie sans batterie. Il démontre qu'un capteur peut fonctionner avec une source d'énergie non fiable en adaptant les caractéristiques de transmission à la quantité d'énergie disponible. Un outil de comparaison des protocoles de communication pour l'IoT est proposé dans l'article [197]. Cette solution calcule la consommation d'énergie pour un protocole donné en fonction du temps de fonctionnement et de la puissance requise. Cette modélisation se veut généraliste et ne considère pas tous les paramètres de fonctionnement et toutes les caractéristiques de modulation. Un modèle analytique est également fourni dans l'article [198] afin d'estimer le courant moyen consommé par un capteur à partir de mesures réalisées en laboratoire. Cependant, ce modèle ne tient pas compte de l'environnement, et en particulier de la densité de nœuds dans le réseau qui a un impact important sur le nombre de collisions et donc la consommation d'énergie. D'autres travaux utilisent la consommation d'énergie comme métrique pour étudier l'évolutivité ou la fiabilité. Dans l'article [199], un simulateur est construit à l'aide d'un modèle basé sur des expériences. Les articles [200, 201] présentent également des simulateurs qui évaluent les performances du protocole LoRa afin d'optimiser la consommation d'énergie d'un dispositif.

Ces travaux, basés sur des simulations, ne considèrent pas toutes les recommandations de la spécification LoRaWAN. De plus, ces études considèrent souvent la consommation d'énergie de l'ensemble du réseau, là où le modèle analytique présenté dans ce chapitre se concentre sur la consommation d'énergie d'un nœud LoRaWAN dans son environnement, permettant ainsi une comparaison efficace avec le protocole 802.11ah étudié dans le chapitre précédent.

5.2 Fonctionnement des protocoles LoRa/LoRaWAN

5.2.1 Architecture des réseaux LoRa/LoRaWAN

L'architecture et les opérations réalisées par un réseau LoRa/LoRaWAN ont été décrites en détail dans la littérature [65, 91, 92, 94, 202, 203]. La topologie est de type étoile, comme le montre la figure 5.1. Les nœuds périphériques forment le réseau de capteurs et sont placés aussi près que possible de l'environnement physique qu'ils surveillent. Ils transmettent des données aux serveurs à travers une ou plusieurs passerelles. Ces passerelles effectuent un transfert de protocole afin d'adapter les communications entre le réseau de capteurs et les serveurs. Les serveurs d'application stockent les données et fournissent des services aux utilisateurs. Le serveur de réseau administre et sécurise la transmission des données en provenance du réseau de capteurs.

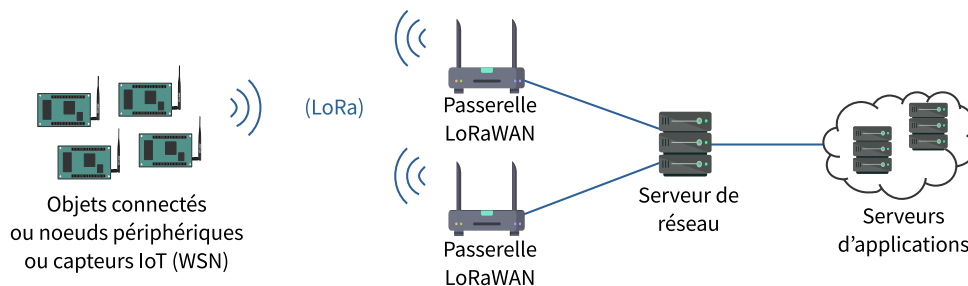


FIGURE 5.1 – Architecture physique d'un réseau LoRa/LoRaWAN.

La solution LoRa/LoRaWAN remplit les fonctions des couches PHY et MAC du modèle OSI. La couche physique LoRa est chargée de la modulation et de l'adaptation du signal au média. La couche LoRaWAN fournit une méthode d'accès au média de type Aloha. La figure 5.2 représente le fonctionnement de la technologie LoRa entre les différents équipements du réseau. Les nœuds périphériques encapsulent les données à transmettre aux serveurs d'application en utilisant les deux couches LoRa/LoRaWAN. La passerelle transmet le paquet en ré-encapsulant la couche LoRaWAN et les données dans une pile TCP/IP plus adaptée à la communication avec les serveurs. Le serveur de réseau utilise la couche LoRaWAN pour transmettre des accusés de réception et gérer les transmissions du réseau de capteurs. Les nœuds peuvent communiquer avec une ou plusieurs passerelles. Les paquets provenant des différentes passerelles sont filtrés par le serveur de réseau avant d'être envoyés aux serveurs d'application.

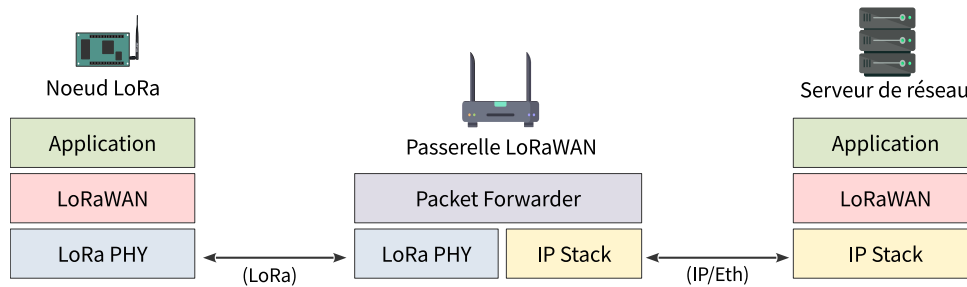


FIGURE 5.2 – Modélisation OSI des protocoles LoRa/LoRaWAN.

5.2.2 La couche physique LoRa

Modulation LoRa

La couche physique LoRa est *open source* et prend en charge des communications bidirectionnelles. Les transmissions sont réalisées en utilisant la modulation CSS dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz et sans licence. Le spectre est étalé, c'est-à-dire que le signal modulé occupe une largeur de bande plus importante que le débit d'informations. Cette technique de modulation a l'avantage de rendre le signal plus résistant au bruit et aux interférences [93, 204, 205], mais favorise également la séparation orthogonale des signaux transmis sur le même canal. Le débit est fortement réduit, ce qui se traduit par une augmentation significative de la portée. Les principales caractéristiques de ce protocole sont résumées dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 – Principales caractéristiques du protocole LoRa.

Caractéristiques	Valeurs
Modulation	Chirp Spread Spectrum (CSS)
Bandes de fréquences	US 915–EU 868
Débit binaire	300 bit/s–37,5 kbit/s
Latence	500 ms (dépend des paramètres)
Bande passante	125, 250 ou 500 kHz
Sensibilité	–120 à –30 dBm
Portée	5 km (en milieu urbain)–15 km (en milieu rural)
Nombre de nœuds	Théoriquement infini

La bande de fréquences utilisée par un équipement LoRa dépend des réglementations régionales [206] et des paramètres du réseau. Chaque canal occupe une largeur de bande de 125, 250 ou 500 kHz. En Europe, deux bandes de fréquences sont autorisées : EU–433 et EU–868. La figure 5.3 représente les canaux utilisés dans la bande EU–868 qui va de 863 à 870 MHz. L'équipement LoRa doit obligatoirement prendre en charge les canaux 868,1 MHz à 868,5 MHz, qui sont nécessaires pour le processus d'association. Les autres canaux ne sont pas obligatoires et peuvent être utilisés pour la liaison montante et descendante en fonction de la configuration

de la passerelle. Le canal à 869,525 MHz est réservé à la transmission descendante uniquement.

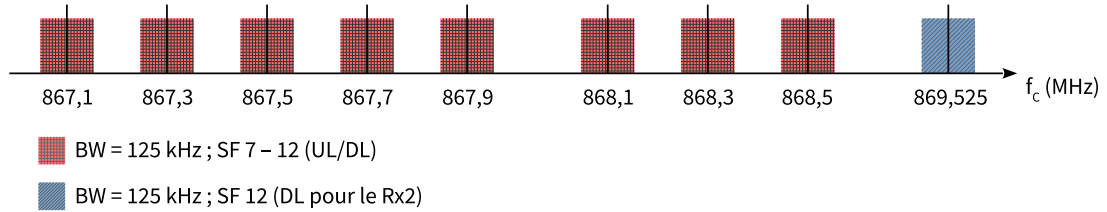


FIGURE 5.3 – Canaux de communication utilisés en Europe.

Avant d'émettre une trame, l'équipement LoRa effectue un certain nombre d'opérations afin d'améliorer la robustesse du signal et augmenter la sensibilité du récepteur. Un code correcteur d'erreurs contenant un à quatre bits de redondance cyclique est ajouté à chaque paquet de 4 bits de données. Ces blocs de données binaires sont ensuite regroupés pour former des symboles de SF bits (SF désigne le facteur d'étalement ou *Spreading Factor*). Les symboles vont moduler un signal CSS par saut de fréquence [93, 204, 205]. La figure 5.4 montre un exemple de modulation CSS où f_c est la fréquence porteuse. À gauche, un signal sinusoïdal non modulé voit sa fréquence varier linéairement en fonction du temps. Lorsqu'il atteint la fréquence maximum $f_{\max} = f_c + \frac{BW}{2}$, il passe à la fréquence minimum $f_{\min} = f_c - \frac{BW}{2}$. À droite, plusieurs symboles ont été modulés, chacun contenant SF bits. Dans cet exemple, le SF est égal à 7 et la valeur numérique peut aller de 0 à 127. Pour les trames en liaison descendante, la polarité du signal modulé est inversée [207] afin de limiter les interférences avec les transmissions en liaison montante.

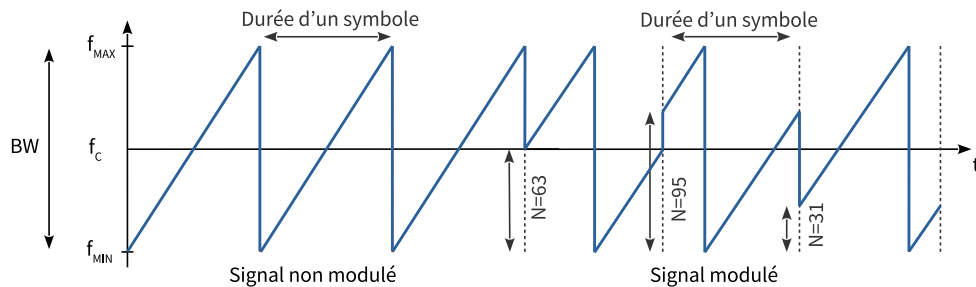


FIGURE 5.4 – Principe de la modulation CSS.

Détermination du débit de données

Le débit binaire dérive directement de l'analyse précédente, et est obtenu par l'équation (5.1) :

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR, \quad (5.1)$$

où R_b , SF, BW et CR désignent respectivement le débit de données (en bit/s), le facteur d'étalement

ment, la largeur de bande du canal et le rendement du code correcteur d’erreurs (de 4/5 à 4/8). Un nœud LoRa adapte ce taux de codage en fonction de la distance qui le sépare de la passerelle, ou lorsqu’il retente une transmission après un échec. Le tableau 5.2 présente les modes de fonctionnement définis et mis en œuvre dans les équipements LoRaWAN [208]. Chaque mode, appelé débit de données (*Data Rate* ou DR), est une combinaison de paramètres de modulation. Le facteur d’étalement SF_i dépend du paramètre DR_i . Les spécifications LoRa/LoRaWAN n’imposent pas de stratégie particulière de gestion des DR, mais recommandent le fonctionnement suivant. Un nœud proche de la passerelle transmet en DR5. Si la transmission échoue, il retransmet la même trame en DR5 et décrémente le DR toutes les deux retransmissions. Un nœud plus éloigné transmet sa première trame avec un DR plus petit et décrémente le DR de la même manière pour les autres tentatives de transmission [208].

TABLEAU 5.2 – Caractéristiques des modes DR en Europe et sensibilité du circuit sx1272.

DR i	i	SF $_i$	BW	CR	Charge maximale	Débit binaire	Sensibilité
DR5	5	7	125 kHz	4/5	250 octets	5,47 kbit/s	−124 dBm
DR4	4	8	125 kHz	4/5	250 octets	3,125 kbit/s	−127 dBm
DR3	3	9	125 kHz	4/5	123 octets	1,76 kbit/s	−130 dBm
DR2	2	10	125 kHz	4/5	59 octets	0,98 kbit/s	−133 dBm
DR1	1	11	125 kHz	4/6	59 octets	0,44 kbit/s	−135 dBm
DR0	0	12	125 kHz	4/6	59 octets	0,25 kbit/s	−137 dBm

Définition du modèle de propagation

Différents modèles de propagation ont été proposés dans la littérature. Les références [200, 201, 209] utilisent un modèle *log-distance* qui inclut l’évanouissement à petite échelle, bien adapté aux environnements denses. L’article [210] fournit des modèles pour le déploiement dans des environnements urbains, forestiers et/ou côtiers. L’article [211] fournit un modèle pour les environnements intérieurs et les références [212, 213] proposent des modèles basés sur des mesures de terrain. Ces modèles sont plus ou moins complexes et peuvent avoir un impact significatif sur les résultats. Afin de simplifier et de faciliter la généralisation de notre modèle énergétique, nous avons choisi d’utiliser un modèle de propagation simple. Avec le modèle considéré, la distance entre le capteur et la passerelle est donnée par l’équation (5.2) :

$$d = \left[\left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 \frac{P_{ta}}{P_{ra}} \right]^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (5.2)$$

où d , c , f , P_{ta} , P_{ra} et γ représentent respectivement la distance entre l’équipement et la passerelle, la vitesse des ondes électromagnétiques, la fréquence de transmission, la puissance transmise, la puissance reçue et l’indice d’affaiblissement sur le trajet. Selon la réglementation européenne,

la puissance maximale autorisée pour la transmission est fixée à 25 mW ou 14 dBm [206]. Les valeurs de l'indice d'affaiblissement sur le trajet sont $\gamma = 2$ en espace libre, $\gamma = 3$ en milieu urbain et $\gamma = 6$ en milieu très obstrué. Dans notre étude, l'indice d'affaiblissement sur le trajet est considéré comme égal à 3 et P_{ra} est déterminé à l'aide de la fiche technique du circuit SX1272 [214]. Dans notre modèle énergétique, nous déterminons le débit de données utilisé par le capteur lors de sa première tentative de transmission en utilisant l'équation (5.2), puis en déterminant le SF_i et le DR_i avec le tableau 5.2.

5.2.3 Les couches MAC et application LoRaWAN

LoRaWAN est une solution basée sur une méthode d'accès au média de type Aloha qui utilise la modulation LoRa au niveau de la couche physique. Afin de partager l'accès au média, la réglementation européenne impose l'utilisation d'une limitation du rapport cyclique ou la gestion de la transmission dite "Listen Before Talk" (annexe A). La spécification LoRaWAN privilégie la première solution avec un rapport cyclique qui doit être inférieur à 1%. Trois classes de fonctionnement - A, B et C - sont définies. Cette étude se concentre uniquement sur la classe A, qui est la plus économe en énergie et qui est de loin la plus utilisée dans les dispositifs [206, 208]. Ce mode de fonctionnement est représenté sur la figure 5.5.

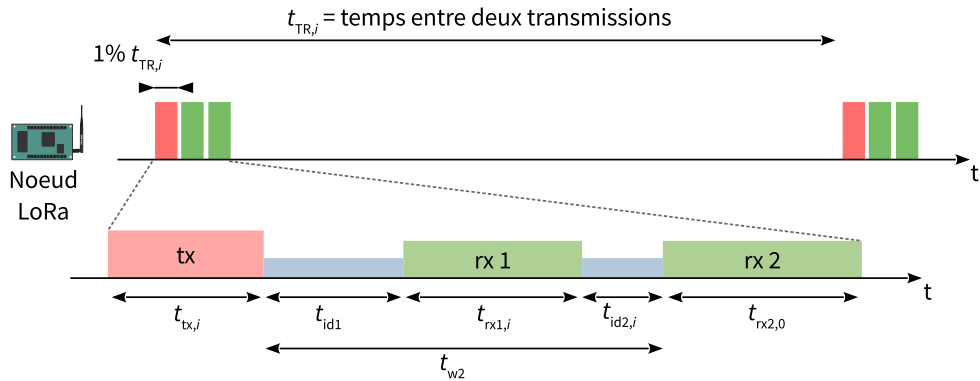


FIGURE 5.5 – Fonctionnement du mécanisme d'accès au média LoRaWAN en Classe A.

Lorsqu'un nœud LoRa a des données à envoyer, il sélectionne aléatoirement un canal et ouvre une fenêtre de transmission (tx) suivie de deux fenêtres de réception (rx1 et rx2) utilisées par le serveur de réseau pour accuser la réception des messages et gérer la communication. Le capteur utilise le même DR_i et le même canal pour transmettre ses données et recevoir l'accusé de réception dans la première fenêtre. Dans la deuxième fenêtre, le capteur et la passerelle utilisent le DR_0 et un canal de transmission préconfiguré à 869,525 MHz en Europe [206, 208]. La durée de transmission ($t_{tx,i}$) et la durée de la première fenêtre de réception ($t_{rx1,i}$) dépendent du DR utilisé ; i représente l'indice du DR et tous les paramètres de transmission, comme indiqué dans le tableau 5.2. La durée de la deuxième fenêtre de réception ($t_{rx2,0}$) est liée aux caractéristiques

du DR0. Le nœud LoRa ouvre la deuxième fenêtre de réception uniquement s’il n’a pas reçu d’accusé de réception dans la première fenêtre. Afin de minimiser la consommation d’énergie, la spécification LoRaWAN recommande de laisser l’équipement en état de réception uniquement si un préambule est détecté au début d’une des fenêtres de réception. Dans le cas contraire, l’équipement retourne à l’état inactif. La durée d’une fenêtre de réception peut donc prendre différentes valeurs, données par les équations (5.3) et (5.4) :

$$t_{rx1,i} = \begin{cases} t_{ack,i} & \text{si un préambule est détecté dans la fenêtre rx1.} \\ t_{pre,i} & \text{si aucun préambule n'est détecté dans la fenêtre rx1.} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$t_{rx2,0} = \begin{cases} t_{ack,0} & \text{si un préambule est détecté dans la fenêtre rx2.} \\ t_{pre,0} & \text{si aucun préambule n'est détecté dans la fenêtre rx2.} \\ 0 & \text{si la fenêtre rx2 n'est pas utilisée.} \end{cases} \quad (5.4)$$

Les créneaux de transmission et de réception sont espacés par deux temps de veille (t_{id1} et $t_{id2,i}$). t_{id1} peut prendre une valeur comprise entre 1 et 15 secondes (classiquement, $t_{id1} = 1$ s). t_{w2} représente le temps écoulé entre la fin de la transmission et le début de la deuxième fenêtre de réception ($t_{w2} = t_{id1} + t_{rx1,i} + t_{id2,i}$). t_{w2} peut prendre une valeur comprise entre 2 et 16 secondes (classiquement, $t_{w2} = 2$ s) [206, 208]. Dans notre étude, et en respectant les recommandations des spécifications, nous considérons que tous les messages doivent être confirmés et que le serveur du réseau n’envoie que des accusés de réception, ce qui est le cas dans un réseau LoRaWAN fonctionnant normalement.

Structure de la trame LoRaWAN

La figure 5.6 montre une trame de couche physique LoRa. Elle contient un en-tête, une charge utile et un CRC (*Cyclic Redundancy Check*) facultatif calculé sur la charge utile. L’en-tête physique commence par le préambule nécessaire à la synchronisation du récepteur. En Europe, la taille est de huit symboles, suivis de deux symboles contenant l’identifiant du réseau (*Synchronization Word* ou SW), et de 2,25 symboles pour indiquer la fin du préambule. En mode implicite, le reste de l’en-tête n’est pas nécessaire. En mode explicite, un champ de 8 bits définit la longueur de la charge utile, un bit CRC indique si le CRC est présent à la fin de la trame, un champ de 3 bits contient la valeur CR (*Code Rate*) utilisée pour coder la charge utile, et un CRC de 8 bits est calculé sur l’en-tête. La charge utile, de 0 à 255 octets, contient l’en-tête MAC, la charge MAC et le MIC (*Mandatory Integrity Control*), comme indiqué sur la figure 5.7.

Trois champs composent l’en-tête MAC : le type, le champ RFU pour une utilisation future et le champ *major* qui indique la version du protocole. Le champ MIC de 4 octets est utilisé pour vérifier l’intégrité des données. Dans la charge utile, l’en-tête *Frame* contient des informations sur les données transportées. Les champs FPort, DevAddr, FCtrl, FCnt, FOpts

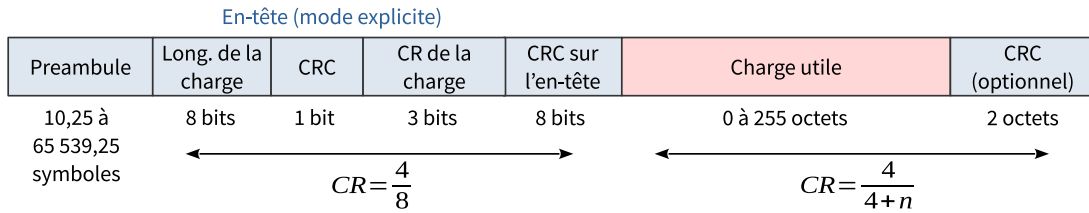


FIGURE 5.6 – Structure de la trame LoRa de couche physique.

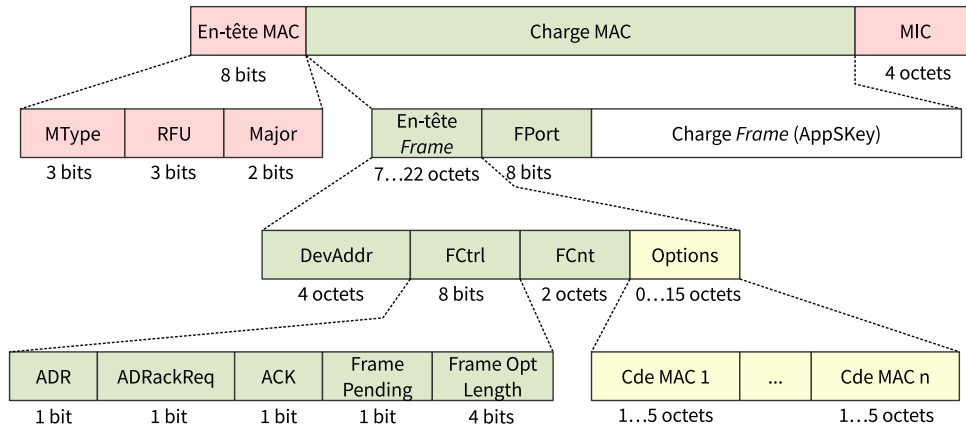


FIGURE 5.7 – Structure de la trame LoRaWAN des couches MAC et application.

contiennent respectivement le numéro du port de service, l'adresse du nœud, des informations sur la transmission, le compteur de trames, le compteur de commandes MAC transmises par le serveur de réseau pour gérer la communication d'un nœud. Pour le reste de l'étude, et par souci de simplification, nous considérons une charge constante de 50 octets pour les trames de données et un en-tête physique en mode explicite. Selon la norme, les trames ACK n'ont pas de charge au niveau de la couche applicative et pas de CRC au niveau de la couche physique. La taille des différentes trames utilisées dans cette étude est synthétisée dans le tableau 5.3.

TABLEAU 5.3 – Taille des trames LoRa/LoRaWAN.

Type de Trame	Préambule	H1	H2	H3+FPayload	CRC
DATA	12,25 symb	20 bits	5 octets	58 octets	16 bits
ACK	12,25 symb	20 bits	5 octets	8 octets	-

La charge utile de couche physique est déterminée à partir des figures 5.6 et 5.7, par les équations (5.5) et (5.6) :

$$PL_{\text{data}} = H2 + H3 + \text{FPayload}, \quad (5.5)$$

$$PL_{\text{ack}} = H2 + H3, \quad (5.6)$$

où PL_{data} , PL_{ack} , H2, H3 et FPayload désignent respectivement la taille de la charge utile de couche physique pour une trame de données et une trame ACK, la taille de l'en-tête MAC et du champ MIC, la taille de l'en-tête *Frame* et de la charge utile pour la trame de données. À partir de ces équations, le nombre de symboles contenus dans les trames de données et la trame ACK est déterminé par les équations (5.7) et (5.8), où H1, CR, CRC et DE désignent respectivement la taille de l'en-tête physique, le taux de codage, la taille du CRC utilisé pour la trame de données et un facteur d'optimisation pour les transmissions à faible débit. $DE = 1$ lorsque $SF_i = 11$ ou $SF_i = 12$, et 0 sinon [208].

$$N_{\text{data},i} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{H1 + 8 \cdot PL_{\text{data}} + CRC + 8 - 4 \cdot SF_i}{4 \cdot (SF_i - 2 \cdot DE)} \right\rceil \cdot \frac{4}{CR_i}, 0 \right), \quad (5.7)$$

$$N_{\text{ack},i} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{H1 + 8 \cdot PL_{\text{ack}} + 8 - 4 \cdot SF_i}{4 \cdot (SF_i - 2 \cdot DE)} \right\rceil \cdot \frac{4}{CR_i}, 0 \right). \quad (5.8)$$

5.2.4 Temps de transmission des trames LoRa (ToA)

Comme le montre la figure 5.5, un dispositif LoRa se retrouve dans différents états de fonctionnement au cours d'une phase de communication. Les temps correspondant au traitement des données, au réveil et à la désactivation de l'interface radio sont incompressibles et dépendent uniquement des circuits électroniques mis en œuvre sur la carte. Les temps de transmission et de réception ($t_{\text{tx},i}$, $t_{\text{rx1},i}$ et $t_{\text{rx2},0}$) varient en fonction des caractéristiques de la modulation LoRa et du type de trames échangées. Les valeurs de $t_{\text{tx},i}$, $t_{\text{ack},i}$ et $t_{\text{pre},i}$ sont obtenues par les équations (5.9), (5.10) et (5.11) :

$$t_{\text{tx},i} = (\text{NP} + \text{SW} + 2.25 + N_{\text{data},i}) \cdot T_{s,i}, \quad (5.9)$$

$$t_{\text{ack},i} = (\text{NP} + \text{SW} + 2.25 + N_{\text{ack},i}) \cdot T_{s,i}, \quad (5.10)$$

$$t_{\text{pre},i} = \text{NP} \cdot T_{s,i}, \quad (5.11)$$

où $T_{s,i} = \frac{2^{SF_i}}{\text{BW}}$ est la durée d'un symbole.

5.3 Mesure de l'énergie consommée par un nœud LoRaWAN

5.3.1 Analyse théorique de la consommation d'énergie

Avec les éléments obtenus dans la partie précédente, un premier modèle de consommation d'énergie est proposé sans tenir compte des collisions et des erreurs de transmission. D'après la

figure 5.5, l'énergie consommée par un dispositif qui reçoit l'accusé de réception dans la première fenêtre est obtenue par l'équation (5.12) :

$$E_{\text{bit}} = \frac{P_{\text{tx}} \cdot t_{\text{tx},i} + P_{\text{id}} \cdot t_{\text{id}1} + P_{\text{rx}} \cdot t_{\text{ack},i}}{8 \cdot \text{FPayload}}, \quad (5.12)$$

où E_{bit} , P_{tx} , P_{rx} , P_{id} désignent respectivement l'énergie moyenne consommée par le nœud pour chaque bit utile transmis, la puissance consommée par le nœud lors de la transmission, de la réception et des périodes de veille. De la même manière, l'énergie consommée par un nœud qui reçoit l'accusé de réception dans la deuxième fenêtre est obtenue par l'équation (5.13) :

$$E_{\text{bit}} = \frac{P_{\text{tx}} \cdot t_{\text{tx},i} + P_{\text{id}} \cdot t_{\text{id}1} + P_{\text{rx}} \cdot t_{\text{pre},i} + P_{\text{id}} \cdot t_{\text{id}2,i} + P_{\text{rx}} \cdot t_{\text{ack},0}}{8 \cdot \text{FPayload}}. \quad (5.13)$$

5.3.2 Protocole de mesure expérimental mis en œuvre

Le courant consommé et le temps passé par un circuit LoRa dans les différents états de fonctionnement sont mesurés avec un analyseur de courant CX3300 muni d'une sonde CX1102A. Pour réaliser ces mesures, une communication LoRaWAN a été mise en œuvre entre un capteur et un serveur de réseau. Les figures 5.8 et 5.9 montrent le banc d'essai utilisé.

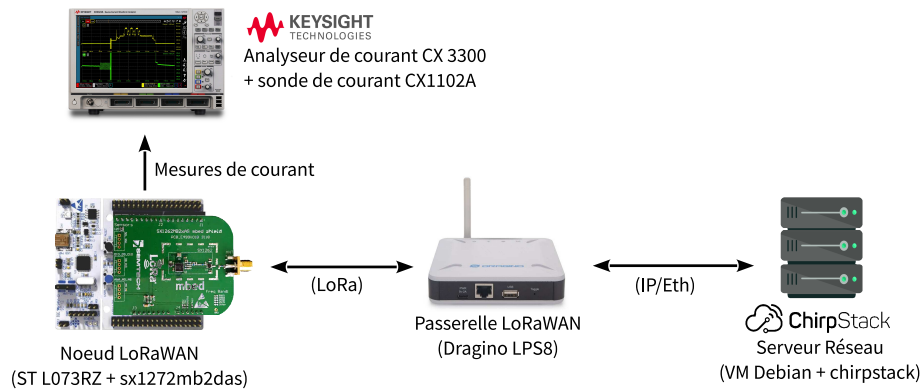


FIGURE 5.8 – Banc d'essai expérimental utilisé pour mesurer les courants consommés par un capteur LoRa.

Le capteur LoRa est constitué d'une carte Nucleo L073RZ et d'un *shield* LoRa sx1272mb2das. La passerelle est une Dragino LPS-8 et le serveur de réseau est construit autour d'une solution *Chirpstack* installée sur un OS *Debian*. Toutes les communications respectent les spécifications LoRaWAN. L'authentification du nœud auprès du serveur de réseau est réalisée avec la méthode ABP (*Activation By Personalisation*). L'équipement LoRa transmet des paquets de 50 octets de données à intervalles réguliers, en respectant le cycle de service, et en diminuant le DR à chaque tentative de transmission. Plusieurs paramètres utilisés par le nœud sont configurés dans le serveur de réseau et transmis aux dispositifs par des commandes MAC. Les valeurs minimale

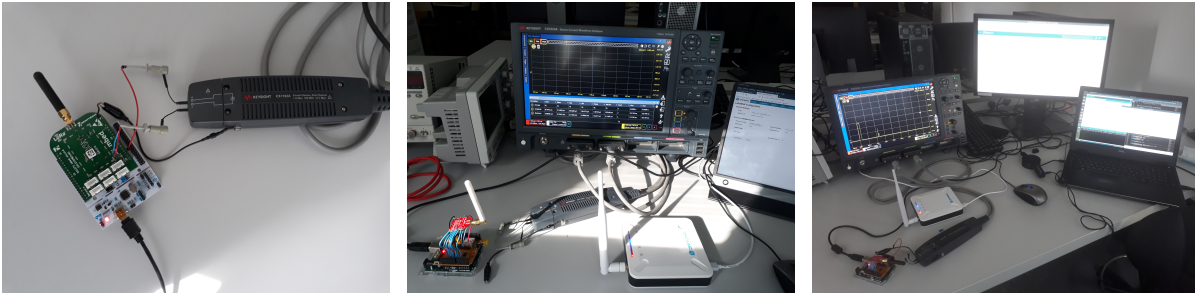


FIGURE 5.9 – Photographies du banc d’essai expérimental utilisé pour mesurer les courants consommés par un capteur LoRa.

et maximale du DR sont fixées à 0 et à 5 ; le créneau rx2 est configuré avec un DR0 sur le canal à 869,525 MHz et la puissance maximale autorisée est de 14 dBm. À chaque nouvelle tentative de transmission, le canal est choisi au hasard et le DR utilisé pour recevoir l’ACK dans la première fenêtre est le même que celui utilisé pour la transmission. Les temps de veille sont configurés à la valeur minimale, $t_{id1} = 1$ s et $t_{w2} = 2$ s. Afin d’éviter les collisions, les mesures sont réalisées avec un seul capteur dans le réseau.

5.3.3 Résultats des mesures de consommation énergétique

La figure 5.10 représente l’évolution du courant consommé par le module sx1272 dans une phase de communication lorsque l’ACK a été reçu dans la première fenêtre de réception (a), lorsque l’ACK n’a pas été reçu dans la première fenêtre de réception mais dans la deuxième fenêtre de réception (b) et lorsque le nœud n’a pas reçu d’ACK (c).

Ces figures montrent les résultats des mesures pour différents états de fonctionnement. Dans chaque cas, le circuit commence par se positionner dans un état de transmission suivi d’un ou deux états d’inactivité et de réception. Les durées de transmission et de réception ($t_{tx,i}$, $t_{rx1,i}$, $t_{rx2,0}$) dépendent du DR utilisé par le nœud et de sa localisation. Si un ACK est reçu dans la première fenêtre de réception, l’équipement n’ouvre pas la deuxième fenêtre de réception (figure 5.10a). Si le serveur de réseau n’envoie pas d’accusé de réception ou s’il n’est pas reçu par le nœud, ce dernier reste en état de réception pendant un temps inférieur ou égal à la durée du préambule et ouvre une deuxième fenêtre de réception (figure 5.10b). Enfin, si un ACK n’est pas reçu dans la deuxième fenêtre de réception, le nœud reste en état de réception uniquement pendant le temps d’un préambule (figure 5.10c) et passe en mode veille. La figure 5.11a détaille le moment où le capteur est en état de transmission et la figure 5.11b celui où le capteur est en état de réception. Chaque événement commence par une phase de réveil et se termine par une phase de mise en veille du circuit.

Les mesures sont réalisées pour tous les DR, les résultats sont synthétisés dans les tableaux 5.4 et 5.5. Le tableau 5.4 contient les courants absorbés par le circuit dans les différents états de

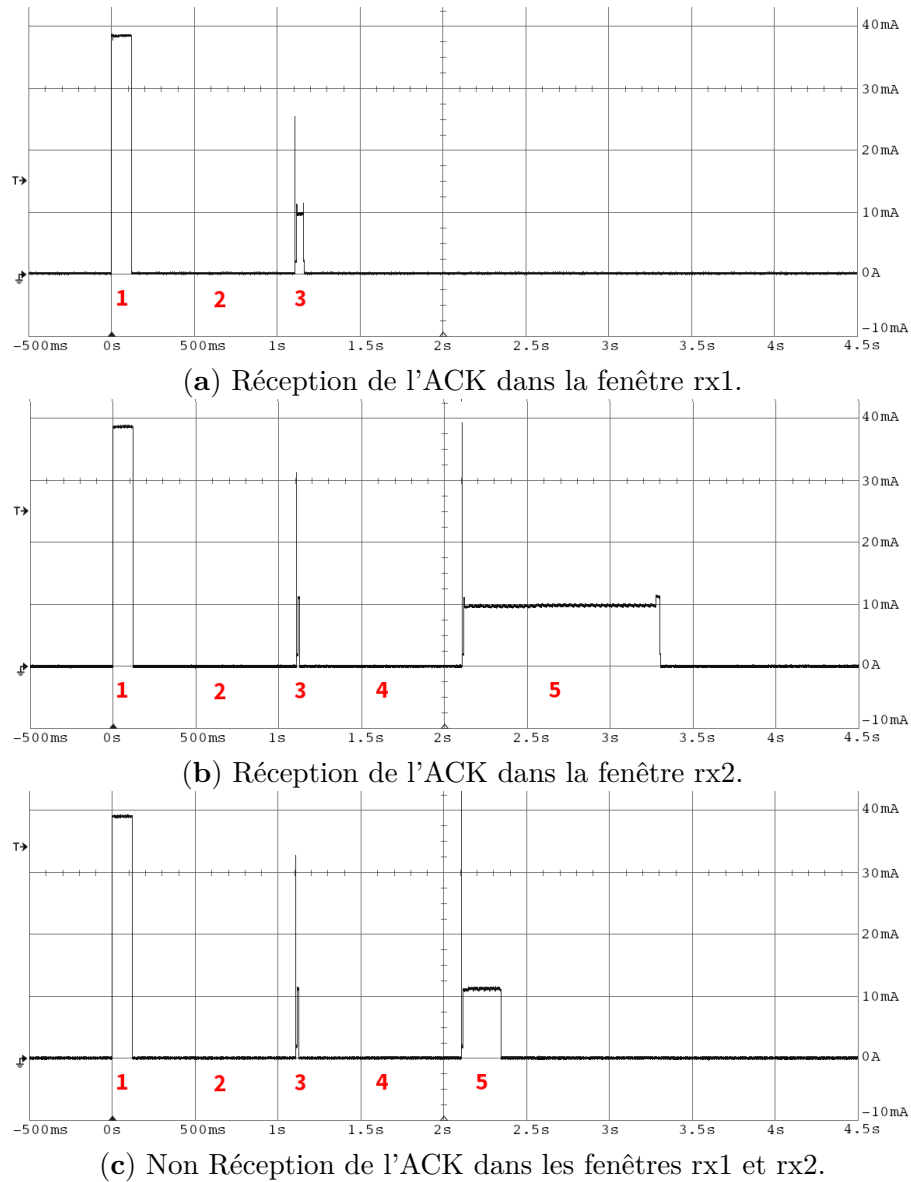


FIGURE 5.10 – Courant consommé par le circuit sx1272 lors de différentes phases de transmission LoRaWAN ($P_{ta} = 14$ dBm, DR = 5).

fonctionnement au cours d'une phase de communication. Les valeurs théoriques sont celles spécifiées dans la documentation technique [214] et les valeurs expérimentales sont celles obtenues par les mesures. Le courant consommé pour le réveil (I_{txwu} , I_{rxwu}), pour la mise en veille (I_{rxoff} , I_{txoff}) et pour la réception (I_{rx}) sont constants, quel que soit le DR utilisé. Le courant consommé par le circuit pendant la phase de transmission (I_{tx}) varie en fonction de la puissance de transmission. Les valeurs mesurées sont très proches de celles spécifiées dans la documentation technique [214], à l'exception du courant de repos qui est 100 fois plus élevé. Les tableaux 5.4 et 5.5 contiennent

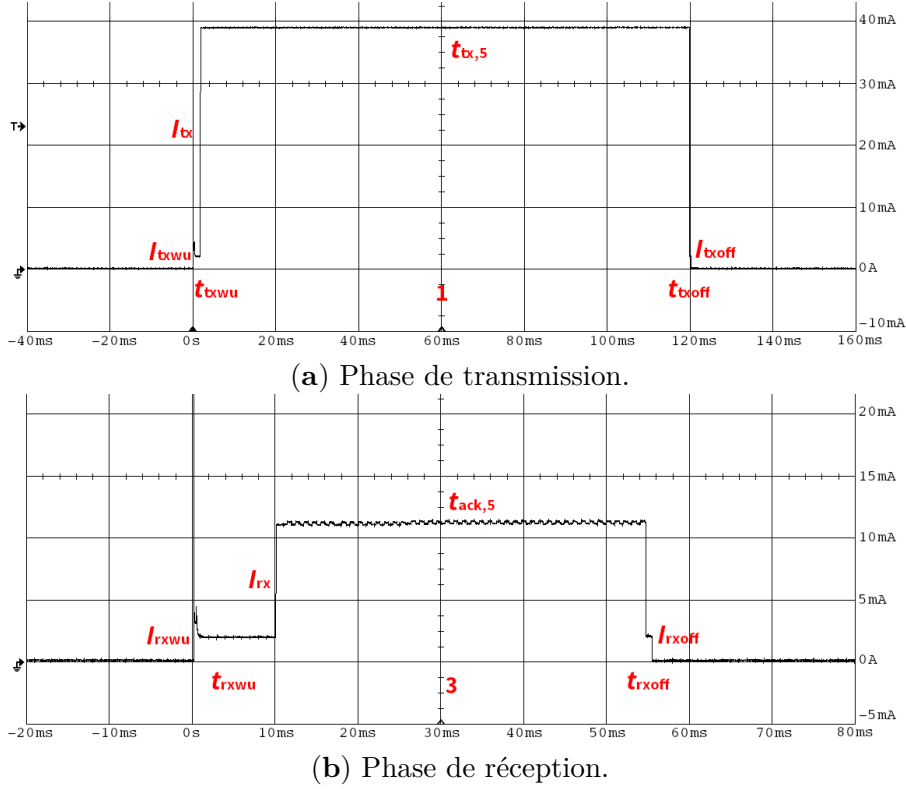


FIGURE 5.11 – Courant consommé par le circuit LoRa lors des phases de transmission et de réception ($P_{ta} = 14$ dBm, DR = 5).

également le temps passé par le circuit dans les différents états de fonctionnement. Les temps de réveil (t_{txwu} , t_{rxwu}) et de mise en veille (t_{txoff} , t_{rxoff}) sont constants, quel que soit le DR utilisé. Le temps nécessaire à la transmission des données ($t_{tx,i}$), à la réception d'un ACK ($t_{ack,i}$) et à l'écoute d'un préambule ($t_{pre,i}$) dépendent du DR. Les valeurs théoriques obtenues avec les équations (5.9), (5.10) et (5.11) correspondent à celles mesurées en laboratoire et présentées dans le tableau 5.5. Par la suite, les valeurs théoriques sont privilégiées afin d'obtenir une modélisation générique du fonctionnement.

Afin d'avoir une vision complète de la consommation énergétique du capteur LoRa et pour pouvoir la comparer avec celle du 802.11ah, nous avons mesuré le courant consommé par la carte *Nucleo L073RZ* lors d'une phase de réveil [215]. La carte *L073RZ* est équipée d'un processeur *Cortex M0+*, avec 192 ko de mémoire *Flash* et de 20 ko de RAM. Elle dispose des interfaces nécessaires au déploiement d'une solution IoT [216]. Le module *sx1272* est piloté par la liaison SPI et le programme est codé en langage C++. Les mesures physiques sont réalisées par la carte *Nucleo L073RZ* à l'aide d'un capteur *BME-680* via une liaison I2C (*Inter-Integrated Circuit*). La figure 5.12 représente l'évolution du courant consommé par la carte *L073RZ* lors d'une phase de réveil. Le tableau 5.6 synthétise la valeur du courant et la durée des différentes phases. La carte

TABLEAU 5.4 – Courants consommés dans les différents états de fonctionnement.

Phases	Courant consommé			Durée	
	Paramètres	Valeurs théoriques	Valeurs expérimentales	Paramètres	Valeurs expérimentales
1	I_{txwu}	•	2,268 mA	t_{txwu}	1,722 ms
	$I_{tx} (P_{ta})$	18 mA 28 mA	21,86 mA (3 dBm) 22,36 mA (7 dBm) 23,53 mA (9 dBm) 31,37 mA (12 dBm) 32,63 mA (13 dBm) 39,43 mA (14 dBm)	$t_{tx,i}$	dépend du DR (tableau 5.5)
	I_{txoff}	•	2,072 mA	t_{txoff}	0,3 ms
	I_{id}	1,5 μ A	123,4 μ A	t_{id1}	1 s
3	I_{rxwu}	•	1,996 mA	t_{rxwu}	9 ms
	I_{rx}	10,5 mA	10,76 mA	$t_{ack,i}$ ou $t_{pre,i}$	dépend du DR (Tab. 5.5)
	I_{rxoff}	•	2,033 mA	t_{rxoff}	0,3 ms
4	I_{id}	1,5 μ A	123,4 μ A	$t_{id2,i}$	$t_{w2} - t_{id1} - t_{rx1,i}$
5	I_{rxwu}	•	1,86 mA	t_{rxwu}	9 ms
	I_{rx}	10,5 mA	11,12 mA	0 ou $t_{ack,0}$ ou $t_{pre,0}$	dépend du DR (Tab. 5.5)
	I_{rxoff}	•	2,054 mA	t_{rxoff}	0,3 ms

TABLEAU 5.5 – Durées des trames de données et de la trame ACK.

DR <i>i</i>	Valeurs théoriques			Valeurs expérimentales		
	$t_{tx,i}$	$t_{ack,i}$	$t_{pre,i}$	$t_{tx,i}$	$t_{ack,i}$	$t_{pre,i}$
DR5	118 ms	41,2 ms	8,2 ms	117,9 ms	39,8 ms	5 ms
DR4	215,6 ms	82,4 ms	16,4 ms	204,95 ms	78 ms	10 ms
DR3	390,1 ms	144,4 ms	32,7 ms	371 ms	140 ms	21 ms
DR2	698,4 ms	288,7 ms	65,5 ms	695 ms	290 ms	41 ms
DR1	1,708 s	626,7 ms	131 ms	1,675 s	612 ms	82 ms
DR0	3,219 s	1253 ms	262,1 ms	3,195 s	1,134 s	230 ms

L073RZ a été spécifiquement conçue pour consommer peu de courant. Elle peut fonctionner selon différents modes, avec une consommation d'énergie plus ou moins importante. Dans cette expérimentation, le mode *standby - deep sleep* est utilisé entre deux phases de réveil car il est très économe en énergie et le mode *normal sleep* entre deux tentatives de transmission.

Sur la figure 5.12, les phases (1) à (6) correspondent respectivement au réveil de l'équipement par le système de gestion des interruptions, à la récupération des données en mémoire de rétention, au chargement du programme et à la mesure puis au traitement des données avant transmission. Les phases (7), (9), (11) et (13) correspondent à l'échange de données entre le

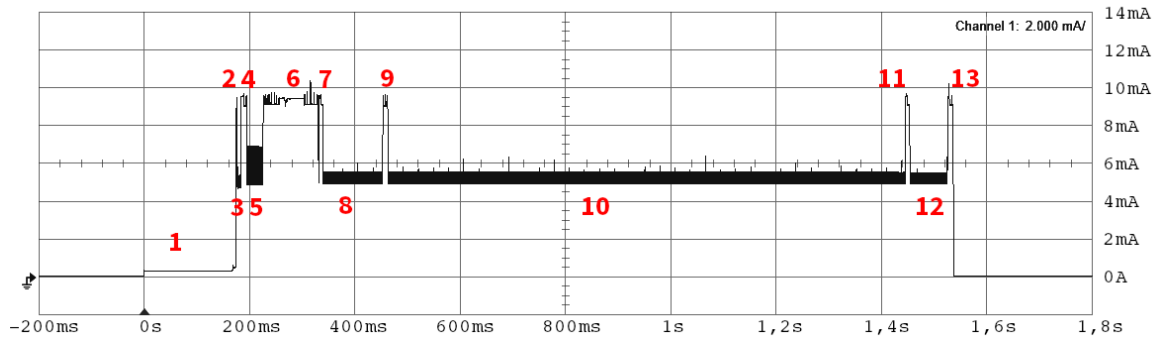


FIGURE 5.12 – Courant consommé par la carte *Nucleo* L073RZ lors d’une phase de réveil pour un ACK reçu dans la première fenêtre de réception ($DR = 5$).

TABLEAU 5.6 – Courant consommé par la carte *Nucleo* L073RZ lors d’une phase de réveil pour un ACK reçu dans la première fenêtre de réception ($DR = 5$).

Phases	Courant consommé		Durée	
	Paramètres	Valeurs expérimentales	Paramètres	Valeurs expérimentales
1	I_{wu1}	258,6 μ A	t_{wfi}	174 ms
2	I_{wu2}	9,13 mA	t_{wu1}	2 ms
3	I_{wu3}	4,40 mA	t_{wu2}	7 ms
4	I_{wu4}	8,89 mA	t_{wu3}	11 ms
5	I_{wu5}	4,52 mA	t_{wu4}	32 ms
6	I_{wu6}	9,92 mA	t_{wu5}	105 ms
7	I_{spi}	9,39 mA	t_{spi}	8 ms
8	I_{tx73}	4,61 mA	$t_{tx,i}$	118 ms
9	I_{spi}	9,39 mA	t_{spi}	8 ms
10	I_{id73}	4,62 mA	t_{id1}	984 ms
11	I_{spi}	9,39 mA	t_{spi}	8 ms
12	I_{rx73}	4,59 mA	$t_{ack,i}$ ou $t_{pre,i}$	49 ms
13	I_{spi}	9,39 mA	t_{spi}	8 ms

circuit sx1272 et la carte L073RZ, via la liaison SPI. La transmission des données est réalisée pendant la phase (8) et la réception pendant la phase (12). La phase (10) correspond au temps de veille t_{id1} entre la transmission et l’ouverture de la première fenêtre de réception. Ces phases sont notées $t_{tx,5}$, $t_{ack,5}$ et t_{id1} sur la figure 5.10. Le courant consommé pendant les phases de sommeil profond a été mesuré à 4,34 μ A et le courant consommé pendant les phases de sommeil entre deux tentatives à 1,75 mA. Par la suite, les résultats de ces mesures sont ajoutés à celles du circuit sx1272 afin d’analyser l’énergie totale consommée par un capteur LoRa.

5.4 Modélisation de la consommation énergétique d'un nœud LoRaWAN

Les modèles de consommation énergétique doivent tenir compte de l'environnement des capteurs IoT. Les erreurs dépendent de la qualité du canal de transmission et de la robustesse de la modulation. Les collisions dépendent de la densité de capteurs présents dans le réseau et du taux de génération de paquets. Dans cette partie, le fonctionnement d'un capteur est modélisé en tenant compte de son environnement, afin de proposer un modèle de consommation énergétique plus réaliste.

5.4.1 Probabilités d'erreur et de collision

Les communications utilisant une méthode d'accès Aloha peuvent souffrir de nombreuses collisions, notamment lorsque le nombre d'équipements est important. Dans ce modèle, on suppose que les messages sont envoyés sur le réseau en respectant un processus de *Poisson* [92]. La probabilité de collision des trames de données est obtenue par l'équation (5.14) :

$$p_{c_{\text{data},i}} = 1 - e^{-2 \cdot N_{\text{sta}} \cdot p_i \cdot \lambda \cdot t_{\text{tx},i}}, \quad (5.14)$$

où $p_{c_{\text{data},i}}$, N_{sta} , p_i et λ désignent respectivement la probabilité d'avoir une collision lors de la transmission d'une trame de données, le nombre d'équipements qui utilisent le même canal, la probabilité qu'un capteur utilise le SF d'index i et le taux de génération de paquets. L'exposant est multiplié par "2" pour refléter la vulnérabilité d'une trame sur une période deux fois plus longue que sa durée. Le produit $N_{\text{sta}} \cdot p_i \cdot \lambda$ représente l'intensité du processus de *Poisson*. Dans cette étude, λ est lié au rapport cyclique imposé par la norme européenne. Le rapport cyclique dc et la valeur de λ sont obtenus par les équations (5.15) et (5.16) :

$$dc = \frac{t_{\text{tx},i}}{t_{\text{ts}}}, \quad (5.15)$$

$$\lambda = \frac{N_{\text{pkt}}}{t_{\text{ts}}}, \quad (5.16)$$

où t_{ts} et N_{pkt} représentent respectivement le temps entre deux transmissions et le nombre de paquets présents dans la mémoire tampon de la station au moment du réveil. Pour des raisons de simplification, la mémoire tampon est considérée comme pleine lorsque $N_{\text{pkt}} = 1$. La densité de capteurs utilisant chaque SF est synthétisée dans le tableau 5.7, à partir des valeurs obtenues dans les articles [92, 207, 217].

La synchronisation des transmissions au niveau du serveur de réseau (et des passerelles) permet d'éviter les collisions entre les différentes trames ACK. Le capteur utilise le même DR*i*

et le même canal pour transmettre ses données et recevoir l’acquittement dans la première fenêtre de réception. Toutefois, les spécifications LoRaWAN exigent que les dispositifs inversent la polarité des signaux pour les messages en liaison descendante [206, 208]. Cette affirmation a été vérifiée par des mesures. Nous considérons donc qu’il n’y a pas de collision entre les trames ACK et les trames de données.

TABLEAU 5.7 – Probabilité de répartition des SF d’un réseau LoRa.

SF_i	7	8	9	10	11	12
p_i	0,19	0,08	0,1	0,14	0,2	0,28

La probabilité d’erreur de transmission pour une modulation de type CSS est obtenue par les équations (5.17) et (5.18), à partir des travaux [198, 218] :

$$p_{e_{\text{data},i}} = 1 - \left(1 - Q \left(\frac{\log_{12}(SF_i) E_b}{\sqrt{2} N_0} \right) \right)^{\frac{1}{CR} \cdot (N_{\text{data},i} - H1)}, \quad (5.17)$$

$$p_{e_{\text{ack},i}} = 1 - \left(1 - Q \left(\frac{\log_{12}(SF_i) E_b}{\sqrt{2} N_0} \right) \right)^{\frac{1}{CR} \cdot (N_{\text{ack},i} - H1)}, \quad (5.18)$$

où $p_{e_{\text{data},i}}$, $p_{e_{\text{ack},i}}$, $\frac{E_b}{N_0}$, $N_{\text{data},i}$, $N_{\text{ack},i}$ désignent respectivement la probabilité d’erreur lors de la réception d’une trame de données ou d’une trame ACK, le rapport signal sur bruit et la longueur des trames déterminées par les équations (5.7) et (5.8). La probabilité de transmettre sans erreur ni collision est définie par les équations (5.19) et (5.20) :

$$p_{\text{data},i} = (1 - p_{e_{\text{data},i}}) \cdot (1 - p_{c_{\text{data},i}}) = \left(1 - Q \left(\frac{\log_{12}(SF_i) E_b}{\sqrt{2} N_0} \right) \right)^{\frac{1}{CR} \cdot (N_{\text{data},i} - H1)} \cdot e^{-2 \cdot N_{\text{sta}} \cdot p_i \cdot \lambda \cdot t_{\text{tx},i}}, \quad (5.19)$$

$$p_{\text{ack},i} = 1 - p_{e_{\text{ack},i}} = \left(1 - Q \left(\frac{\log_{12}(SF_i) E_b}{\sqrt{2} N_0} \right) \right)^{\frac{1}{CR} \cdot (N_{\text{ack},i} - H1)}. \quad (5.20)$$

5.4.2 Modélisation de la consommation énergétique pour une transmission

Analyse théorique du fonctionnement d’un capteur

Le graphe d’état de la figure 5.13 représente les étapes de transmission d’un capteur LoRaWAN. L’équipement se réveille et commence par transmettre ses données. Il se retrouve ensuite dans une des quatre situations détaillées sur la figure 5.14 :

- ● 1 : la passerelle reçoit les données avec succès, puis le capteur reçoit un accusé de réception dans la première fenêtre, avec une probabilité $p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{ack},i}$;

- ● 2 : la passerelle reçoit les données avec succès, mais le capteur ne reçoit pas l'accusé de réception dans la première fenêtre (avec une probabilité $p_{\text{data},i} \cdot (1 - p_{\text{ack},i})$). Il ouvre alors la deuxième fenêtre et y reçoit correctement l'accusé de réception ;
- ▲ 3 : la passerelle reçoit les données avec succès, mais le capteur ne reçoit pas l'accusé de réception dans la première fenêtre (avec une probabilité $p_{\text{data},i} \cdot (1 - p_{\text{ack},i})$). Il ouvre alors la deuxième fenêtre mais n'y reçoit pas l'accusé suite à une erreur de transmission ;
- ▲ 4 : la passerelle ne reçoit pas les données (avec une probabilité $1 - p_{\text{data},i}$). Le nœud n'en est pas conscient, il ouvre donc les deux fenêtres de réception (rx1 et rx2) pendant un temps équivalent au préambule d'une trame ACK.

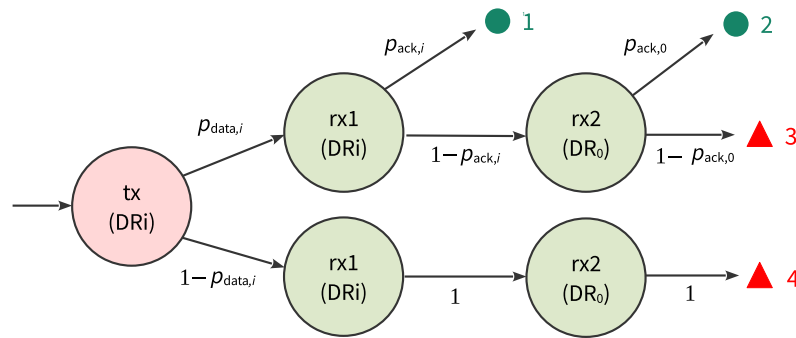


FIGURE 5.13 – Diagramme d'état d'un nœud LoRaWAN lors d'une transmission.

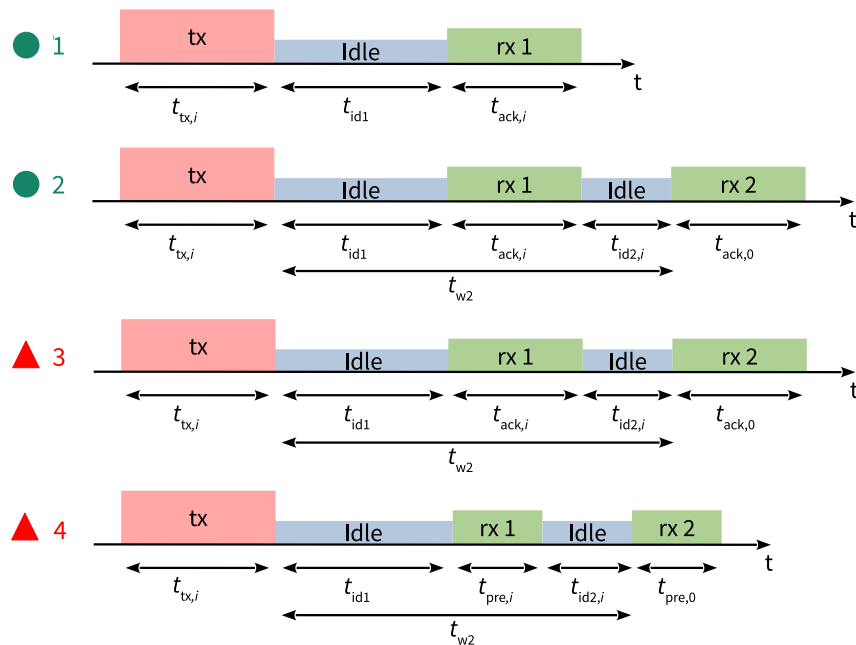


FIGURE 5.14 – Évolution de l'état d'un nœud LoRaWAN lors d'une transmission.

Lorsque la transmission est réussie (●1 et ●2), le nœud passe dans un état de sommeil

profond pendant un temps minimum égal à $t_{TR,i}$, afin de respecter le rapport cyclique. Lorsque la transmission est un échec (▲3 et ▲4), le nœud passe en état de veille et se prépare à une nouvelle tentative sur un autre canal. Lorsqu'il y a une erreur de transmission, le nœud écoute toute la trame mais n'est pas en mesure de la décoder. Lorsqu'il y a une collision, le nœud écoute un temps équivalent à la détection du préambule, comme indiqué dans les spécifications [206, 208]. L'énergie consommée par un capteur LoRa dans chacune des situations est obtenue par les équations (5.21), (5.22), (5.23) et (5.24) :

$$E_{1,i} = E_{tx,i} + E_{id1} + E_{rx1,i}, \quad (5.21)$$

$$E_{2,i} = E_{tx,i} + E_{id1} + E_{rx1,i} + E_{id2,i} + E_{rx2,0}, \quad (5.22)$$

$$E_{3,i} = E_{tx,i} + E_{id1} + E_{rx1,i} + E_{id2,i} + E_{rx2,0}, \quad (5.23)$$

$$E_{4,i} = E_{tx,i} + E_{id1} + E_{rx1,i} + E_{id2,i} + E_{rx2,0}, \quad (5.24)$$

où $E_{1,i}$, $E_{2,i}$, $E_{3,i}$ et $E_{4,i}$ désignent respectivement l'énergie consommée par le capteur dans les situations 1, 2, 3 et 4 du graphe d'état. Dans ces équations, l'énergie consommée par la carte L073RZ pour se réveiller n'est pas pris en compte (phases 1 à 6 sur la figure 5.12). L'énergie consommée par le circuit sx1272 et la carte L073RZ lors des phases de transmission, de veille et de réception est obtenue par les équations (5.25), (5.26), (5.27), (5.28) et (5.29) :

$$E_{tx,i} = V_{sta} \cdot (I_{txwu} \cdot t_{txwu} + I_{tx} \cdot t_{tx,i} + I_{txoff} \cdot t_{txoff}) + V_{sta} \cdot (I_{tx73} \cdot (t_{txwu} + t_{tx,i} + t_{txoff}) + 2 \cdot I_{spi} \cdot t_{spi}), \quad (5.25)$$

$$E_{rx1,i} = V_{sta} \cdot (I_{rxwu} \cdot t_{rxwu} + I_{rx} \cdot t_{rx1,i} + I_{rxoff} \cdot t_{rxoff}) + V_{sta} \cdot (I_{rx73} \cdot (t_{rxwu} + t_{rx1,i} + t_{rxoff}) + 2 \cdot I_{spi} \cdot t_{spi}), \quad (5.26)$$

$$E_{id1} = V_{sta} \cdot (I_{id} + I_{id73}) \cdot t_{id1}, \quad (5.27)$$

$$E_{rx2,0} = V_{sta} \cdot (I_{rxwu} \cdot t_{rxwu} + I_{rx} \cdot t_{rx2,0} + I_{rxoff} \cdot t_{rxoff}) + V_{sta} \cdot (I_{rx73} \cdot (t_{rxwu} + t_{rx2,0} + t_{rxoff}) + 2 \cdot I_{spi} \cdot t_{spi}), \quad (5.28)$$

$$E_{id2,i} = V_{sta} \cdot (I_{id} + I_{id73}) \cdot t_{id2,i}, \quad (5.29)$$

où $t_{tx,i}$, $t_{rx1,i}$ et $t_{rx2,0}$ sont obtenus par les équations (5.3), (5.4), (5.9) et (5.10). Les autres valeurs sont contenues dans les tableaux 5.4, 5.5 et 5.6.

Résultats et discussions

La figure 5.15 montre le temps passé par un capteur LoRa dans les différentes étapes de fonctionnement pour chaque situation du diagramme d'état (figures 5.13 et 5.14). La première barre représente la somme des temps passés par le nœud lorsqu'un ACK est reçu avec succès dans la première fenêtre ● 1. La deuxième barre représente la somme des temps passés par le nœud lorsqu'un ACK est reçu avec succès dans la deuxième fenêtre ● 2. La troisième barre représente la somme des temps passés par le nœud lorsqu'aucun ACK n'est reçu ▲ 3 et la quatrième barre lorsque la trame de données n'a pas été reçue par la passerelle ▲ 4.

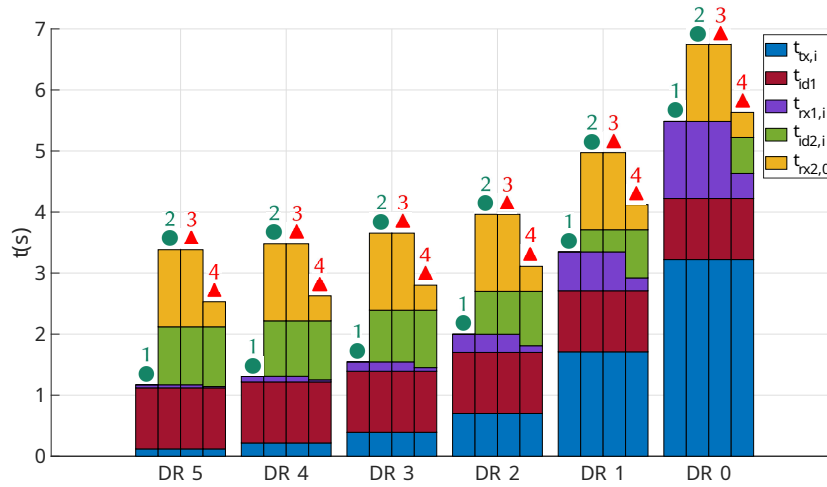


FIGURE 5.15 – Durée d'une phase de communication d'un capteur LoRa dans les différentes situations.

Le temps de transmission $t_{tx,i}$ et les temps de réception $t_{rx1,i}$, $t_{rx2,0}$ varient en fonction des caractéristiques de modulation et de la taille de la trame de données (équations (5.5), (5.6), (5.7), (5.8), (5.9) et (5.10)). Le temps de veille t_{id1} est constant quel que soit le DR utilisé et $t_{id2,i}$ varie en fonction du temps passé par le nœud dans la première fenêtre de réception. Le temps de transmission $t_{tx,i}$ et le temps de réception $t_{rx1,i}$ augmentent dans un rapport de deux lorsque le mode DR diminue d'une unité. Le temps de transmission d'une trame en mode DR0 est dix fois supérieur à celui des modes DR4 et DR5, avec des valeurs respectives de 3,219 s, 218 ms et 118 ms. Proportionnellement, un capteur passe plus de temps dans un état de veille lorsque le DR est élevé et plus de temps dans les états de transmission et de réception lorsque le DR est faible. Le tableau 5.8 contient le temps cumulé passé par un nœud dans toutes les situations. Le temps de réveil est presque triplé lorsque l'équipement ouvre une deuxième fenêtre de réception pour le DR5 et il est multiplié par 1,25 pour le DR0. On peut en conclure que, pour maximiser le temps de sommeil des capteurs, il faut privilégier les communications avec des DR élevés et réduire au maximum l'utilisation de la deuxième fenêtre de réception.

La figure 5.16 montre l'énergie cumulée consommée par un nœud dans les différents DR pour

TABLEAU 5.8 – Durée totale des différentes situations d’une phase de communication.

	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1	DR0
● 1	1,17 s	1,309 s	1,545 s	1,998 s	3,346 s	5,484 s
● 2	3,382 s	3,480 s	3,654 s	3,963 s	4,972 s	6,746 s
▲ 3	3,382 s	3,480 s	3,654 s	3,963 s	4,972 s	6,746 s
▲ 4	2,53 s	2,628 s	2,802 s	3,111 s	4,12 s	5,632 s

chaque situation du diagramme d’état (figures 5.13 et 5.14). Cette figure est obtenue à partir des équations (5.21), (5.22), (5.23) et (5.24). Pour chaque DR, la première barre représente la somme des énergies consommées par un nœud lorsqu’un ACK est reçu avec succès dans la première fenêtre ● 1. La deuxième barre représente la somme des énergies consommées lorsqu’un ACK est reçu avec succès dans la deuxième fenêtre ● 2. La troisième barre représente la somme des énergies consommées par un nœud lorsqu’aucun ACK n’est reçu ▲ 3 et la quatrième barre lorsque les données ne sont pas reçues par la passerelle ▲ 4.

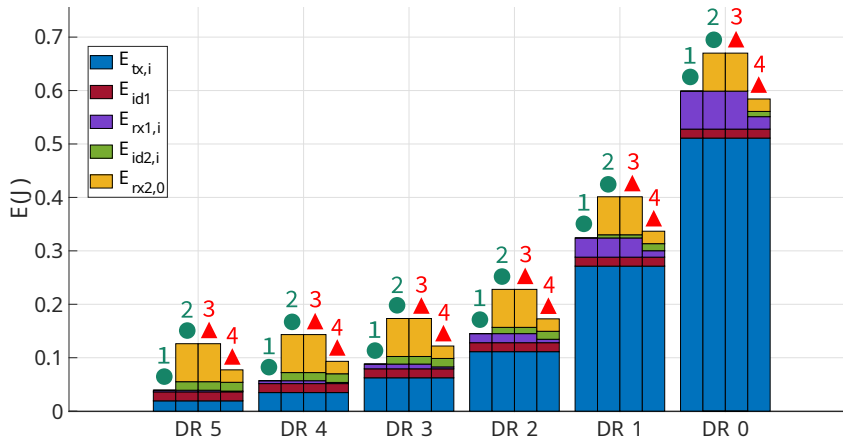


FIGURE 5.16 – Énergie totale consommée par le nœud LoRa dans les différentes situations.

Au cours d’une phase de communication, l’énergie est principalement consommée dans l’état de transmission, puis dans l’état de réception. Dans un état de veille, l’énergie est très faible et E_{id1} est constant quel que soit le DR. Le tableau 5.9 contient la somme de l’énergie consommée par un dispositif dans les différents états de fonctionnement pour chaque situation du graphe d’état. On remarque que l’énergie est multipliée par trois lorsque l’équipement ouvre la deuxième fenêtre de réception en DR5 et qu’elle augmente de 10% lorsque l’équipement ouvre la deuxième fenêtre de réception en DR0. L’impact de l’ouverture de la deuxième fenêtre sur la consommation d’énergie est donc plus important pour les DR élevés. L’écoute du préambule dans les fenêtres de réception permet d’économiser entre 30 et 80 mJ, en mettant plus rapidement l’équipement dans un état de veille.

TABLEAU 5.9 – Énergie totale consommée par le nœud LoRa en phase de communication pour différents DR.

	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1	DR0
● 1	39,18 mJ	56,96 mJ	88,12 mJ	145,09 mJ	324,13 mJ	598,93 mJ
● 2	126,24 mJ	143,31 mJ	173,41 mJ	227,91 mJ	401,18 mJ	670,03 mJ
▲ 3	126,24 mJ	143,31 mJ	173,41 mJ	227,91 mJ	401,18 mJ	670,03 mJ
▲ 4	77,3 mJ	93,26 mJ	121,92 mJ	172,74 mJ	336,74 mJ	584,2 mJ

5.4.3 Modélisation de la consommation énergétique pour une retransmission multiple

Analyse théorique du fonctionnement

Les spécifications LoRaWAN recommandent jusqu'à sept retransmissions en cas d'échec, après quoi le paquet est rejeté. Les tentatives doivent être effectuées sur un autre canal choisi au hasard après un temps d'attente t_{rep} . Ce délai correspond au paramètre *retransmit_timeout* et est également choisi au hasard entre 1 s et 3 s. Le DR diminue toutes les deux retransmissions de 5 à 0. Il est maintenu à 0 pour les transmissions supplémentaires. Pour ce modèle, nous avons choisi d'espacer chaque retransmission par un temps moyen $t_{\text{rep}} = 2$ s, en considérant que les probabilités d'erreur et de collision restent les mêmes à chaque tentative (ce qui est dû à la sélection d'un nouveau canal). Ainsi, la consommation moyenne d'énergie pour une transmission avec un succès ou un échec, est obtenue par les équations (5.30) et (5.31) :

$$\bar{E}_{s,i} = \mathbb{E}[E_{s,i}] = \frac{E_{1,i} \cdot p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{ack},i} + E_{2,i} \cdot p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{eack},i} \cdot p_{\text{ack},0}}{p_{s,i}}, \quad (5.30)$$

$$\bar{E}_{f,i} = \mathbb{E}[E_{f,i}] = \frac{E_{3,i} \cdot p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{eack},i} \cdot p_{\text{eack},0} + E_{4,i} \cdot (1 - p_{\text{data},i})}{p_{f,i}}, \quad (5.31)$$

où $\bar{E}_{s,i}$, $\bar{E}_{f,i}$, $p_{s,i}$ et $p_{f,i}$ désignent respectivement l'énergie moyenne consommée par le nœud et la probabilité d'une transmission réussie (● 1, ● 2) et d'un échec (▲ 3, ▲ 4). Les probabilités $p_{s,i}$ et $p_{f,i}$ sont déterminées à partir de la figure 5.13 et des équations (5.32) et (5.33) :

$$p_{s,i} = p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{ack},i} + p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{eack},i} \cdot p_{\text{ack},0}, \quad (5.32)$$

$$p_{f,i} = p_{\text{data},i} \cdot p_{\text{eack},i} \cdot p_{\text{eack},0} + (1 - p_{\text{data},i}). \quad (5.33)$$

L'énergie totale consommée par un capteur dépend de sa distance par rapport à la passerelle, du nombre de capteurs dans le réseau et du nombre de retransmissions autorisées pour l'équipement. Ce calcul est différent si le nombre de retransmissions est pair ou impair et doit prendre

en compte la double répétition de la phase de transmission avec le même DR. Ces coefficients sont obtenus à l'aide des équations (5.34) et (5.35) :

$$\alpha = \left\lceil \frac{\text{NR}}{2} - 1 \right\rceil, \quad (5.34)$$

$$\beta = 1 + \text{NR} - 2 \cdot \left\lceil \frac{\text{NR}}{2} \right\rceil, \quad (5.35)$$

où $\alpha \in \mathbb{N}$ représente le nombre de doubles retransmissions. $\beta = 1$ si le nombre de transmissions (NR) est pair et $\beta = 0$ si NR est impair. L'énergie totale consommée par un capteur correspond à la somme des énergies statistiquement consommées lors d'une transmission réussie et à la somme des énergies statistiquement consommées lors d'un échec. L'énergie totale moyenne consommée par un nœud est donc obtenue par l'équation (5.36) :

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{tot}} = & E_{\text{wu}} + \sum_{n=0}^{\alpha} \left[(\bar{E}_{s, \max(\text{DR}_M - n, 0)} + \left\lceil \frac{n}{\max(\alpha, 1)} \right\rceil \cdot \sum_{m=0}^{n-1} 2 \cdot \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - m, 0)}) \right. \\ & \times (p_{s, \max(\text{DR}_M - n, 0)} \cdot \prod_{m=0}^{n-1} p_{f, \max(\text{DR}_M - m, 0)}^2) \\ & + \mu \cdot \left(\bar{E}_{s, \max(\text{DR}_M - n, 0)} + \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - n, 0)} + \left\lceil \frac{n}{\max(\alpha, 1)} \right\rceil \cdot \sum_{m=0}^{n-1} 2 \cdot \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - m, 0)} \right) \\ & \times (p_{s, \max(\text{DR}_M - n, 0)} \cdot p_{f, \max(\text{DR}_M - n, 0)} \cdot \prod_{m=0}^{n-1} p_{f, \max(\text{DR}_M - m, 0)}^2) \Big] \\ & + (\beta \cdot \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - \alpha, 0)} + \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - \alpha, 0)} + \sum_{n=0}^{\alpha-1} 2 \cdot \bar{E}_{f, \max(\text{DR}_M - n, 0)}) \\ & \times (p_{f, \max(\text{DR}_M - \alpha, 0)}^{\beta+1} \cdot \prod_{n=0}^{\alpha-1} p_{f, \max(\text{DR}_M - n, 0)}^2), \end{aligned} \quad (5.36)$$

où DR_M et $\mu = \beta \vee \left\lceil \frac{\alpha - n}{\max(\alpha, 1)} \right\rceil$ désignent respectivement le DR initial utilisé par le capteur pour sa première tentative de transmission (notons que DR_M dépend de la distance) et un coefficient qui permet d'ajuster le calcul au nombre de phases afin de respecter le fonctionnement établi dans le graphe d'état (figure 5.13).

5.4.4 Analyse de l'énergie consommée par un nœud LoRaWAN

Dans ce modèle de consommation d'énergie, l'équation (5.2) permet de déterminer le SF utilisé par le capteur pour sa première tentative de transmission. La figure 5.17 représente l'évolution de la portée en fonction du DR et de la puissance d'émission, pour un indice d'affaiblissement de propagation égal à trois. La portée du signal augmente lorsque le mode DR

diminue. Un capteur situé à moins de 4 km de la passerelle peut transmettre en utilisant tous les SF (notez que la meilleure efficacité est atteinte pour DR5). Un dispositif situé à plus de 10 km ne peut utiliser que le SF12, ce qui correspond au DR0. Dans ce modèle, la distance est calculée entre le nœud et la passerelle pour déterminer la valeur de DR_M dans l'équation (5.36), ce qui correspond au DR utilisé par le nœud pour sa première tentative de transmission.

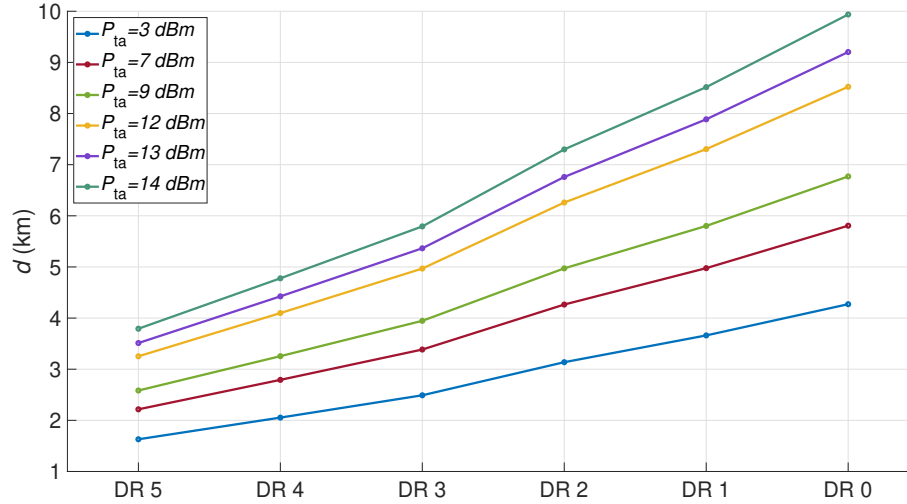


FIGURE 5.17 – Portée maximale d'un nœud LoRa en fonction du DR et de la puissance d'émission.

Le modèle analytique donné par l'équation (5.36) correspond à la consommation énergétique moyenne d'un nœud du réseau. L'énergie par bit utile transmis est définie à partir de ce modèle, $\bar{E}_{\text{bit}} = \frac{\bar{E}_{\text{tot}}}{8 \cdot \text{FP}_{\text{payload}}}$. Le tableau 5.7 indique la probabilité que le nœud considéré utilise un SF spécifique. Cette probabilité est ensuite utilisée pour déterminer le nombre de capteurs du réseau utilisant chaque DR. Cette distribution permet d'obtenir les probabilités d'erreur et de collision. Ainsi, si le nombre de nœuds dans le réseau augmente, les probabilités du tableau 5.7 impliquent une augmentation du nombre de nœuds utilisant le même DR, donc une augmentation de la probabilité de collision. Les équations (5.14), (5.17), (5.18), (5.19) et (5.20) sont utilisées pour déterminer les probabilités de réussite et d'échec sur la base de cette distribution et, enfin, l'équation (5.36) permet de calculer la consommation énergétique moyenne d'un capteur en faisant varier différents paramètres d'entrée :

- la puissance de transmission du nœud LoRaWAN,
- la charge utile transportée dans les trames de données,
- le nombre de retransmissions autorisées,
- la distance entre le capteur LoRaWAN et la passerelle,
- et le rapport cyclique.

La figure 5.18 représente l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN (en trait plein),

en fonction du nombre de capteurs dans le réseau et pour différentes puissances d'émission. La puissance de transmission varie entre 7 et 14 dBm, le nombre de tentatives de transmission a été fixé à huit et la charge utile de la trame de données à 50 octets. Le rapport cyclique est fixé à 1% et le nœud est considéré comme étant à une distance de 1 km de la passerelle.

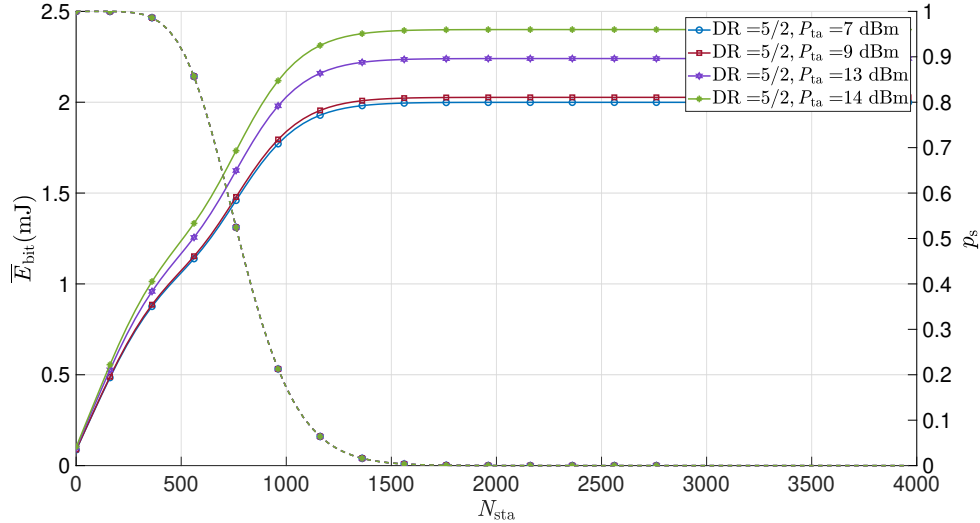


FIGURE 5.18 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes puissances d'émission en fonction du nombre de nœuds dans le réseau (FPayload = 50 octets; NR = 8; $d = 1$ km; $d_c = 1\%$).

On constate que l'énergie moyenne consommée par bit utile augmente avec le nombre de capteurs, jusqu'à atteindre une limite. Notons que pour un capteur dans le réseau, la probabilité de transmission réussie est proche de 1 (●1). Ensuite, le capteur fait une seule tentative et consomme une énergie égale à 41,6 mJ (voir le tableau 5.9 pour la transmission avec un DR5 et le tableau 5.6 pour la phase de réveil), ce qui correspond à une énergie par bit utile de 0,104 mJ. Au contraire, lorsque le nombre de capteurs est très élevé, par exemple 4000, la probabilité d'échec de la transmission est proche de 1 (▲4). Dans ce cas, le nœud effectue huit tentatives avec échec et consomme une énergie égale à 959,95 mJ (voir le tableau 5.9 pour DR5, DR4, DR3 et DR2), ce qui correspond à une énergie par bit utile de 2,39 mJ. Le seuil est obtenu lorsque le nombre de nœuds est supérieur à 2000. Au-delà de cette valeur, le nombre de collisions est trop élevé, la probabilité de succès est trop faible et le nœud utilise le nombre maximum de retransmissions autorisées sans parvenir à transmettre les données. L'énergie consommée par le nœud augmente également avec la puissance de transmission. Il est possible d'en conclure qu'un bon algorithme de débit de données adaptatif (*Adaptive Data Rate* ou ADR) doit tenir compte de la distance afin d'optimiser la puissance de transmission dans chaque DR.

La figure 5.19 représente l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN (en trait plein),

en fonction du nombre de capteurs dans le réseau et pour différentes charges utiles transportées dans les trames de données. La charge utile varie de 10 à 50 octets, la puissance de transmission est fixée à 14 dBm, le nombre de transmissions à huit, la distance entre le nœud et la passerelle à 1 km et le cycle de service est fixé à 1%.

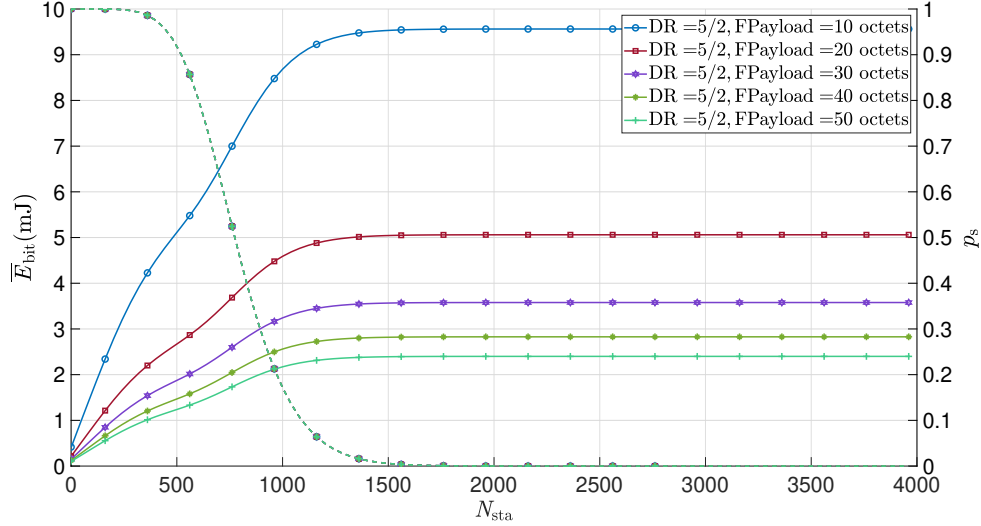


FIGURE 5.19 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes charges utiles en fonction du nombre de nœuds dans le réseau ($NR = 8$; $P_{ta} = 14$ dBm; $d = 1$ km; $dc = 1\%$).

Sur la figure 5.19, l'énergie consommée par bit utile augmente avec le nombre de capteurs jusqu'à atteindre un seuil supérieur à 2000 nœuds. L'énergie consommée évolue également en fonction de la charge utile de la trame de données, avec un rapport d'un quart entre une charge de 10 et une charge de 50 octets. L'augmentation de la charge utile réduit la quantité d'énergie consommée par bit utile mais augmente également le temps de transmission, et donc la probabilité de collisions, comme le montre la figure 5.19.

La figure 5.20 représente l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN (en trait plein), en fonction du nombre de capteurs dans le réseau et pour différents nombres de tentatives de transmission. La charge utile est fixée à 50 octets, la puissance d'émission à 14 dBm et le rapport cyclique à 1%; le DR change en fonction du nombre de tentatives et le nombre de tentatives varie entre un et huit.

Une fois de plus, on constate que l'énergie consommée évolue avec le nombre de capteurs, atteignant un maximum lorsqu'il y a plus de 2000 appareils. Le nombre de tentatives a également un impact sur l'énergie consommée. L'équipement consomme deux fois plus d'énergie pour huit tentatives que pour six et deux fois plus d'énergie pour quatre tentatives que pour deux. Le DR diminue avec les retransmissions supplémentaires, ce qui augmente l'énergie consommée par bit

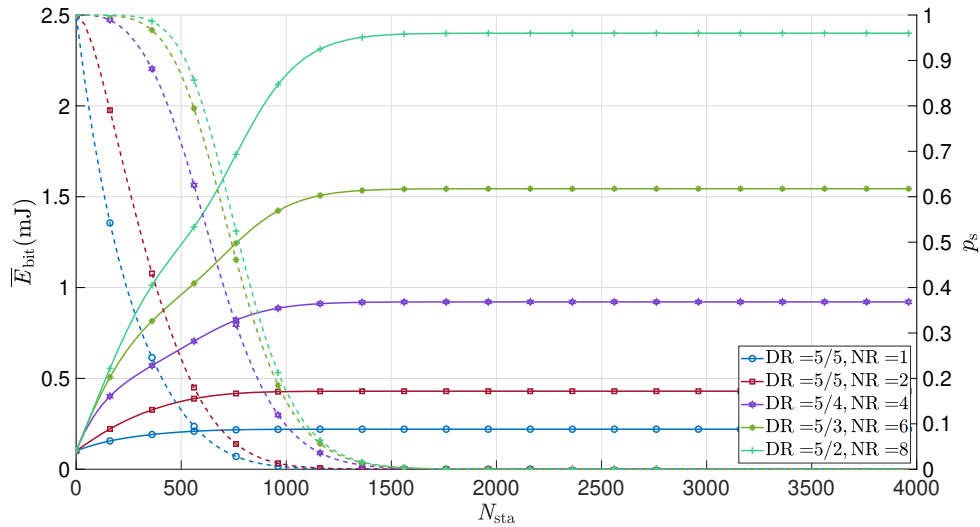


FIGURE 5.20 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différents nombres de tentatives autorisées en fonction du nombre de nœuds dans le réseau (FPayload = 50 octets ; $P_{ta} = 14$ dBm ; $d = 1$ km ; $dc = 1\%$).

utile. Ainsi, chaque tentative supplémentaire augmente le coût énergétique dans un rapport égal au double.

La figure 5.21 représente l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN (en trait plein), en fonction du nombre de capteurs dans le réseau et pour différentes distances séparant le nœud de la passerelle. Le DR varie en fonction de la distance, la charge utile est égale à 50 octets, la puissance est fixée à 14 dBm, le nombre de tentatives à 8 et le rapport cyclique à 1%.

Sur cette figure, on retrouve la même évolution que précédemment. L'énergie consommée par bit utile évolue proportionnellement en fonction de la distance qui sépare le capteur de la passerelle, et ce pour des raisons similaires au nombre de tentatives de transmissions autorisées. Un équipement situé à plus de 10 km ne transmettra qu'avec un DR0 et un équipement situé à moins d'un kilomètre utilisera les DR 5 à 2. Le seuil est également atteint plus rapidement au fur et à mesure que la distance augmente, à environ 750 nœuds pour une distance de 10 km et 2000 pour une distance de 1 km. On peut en conclure que, pour optimiser la consommation d'énergie de l'ensemble du réseau, la transmission des nœuds les plus éloignés doit être favorisée par rapport aux nœuds les plus proches.

La figure 5.22 représente l'évolution de la probabilité de transmission avec succès (en pointillé) et l'énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN (en trait plein), en fonction du nombre de capteurs dans le réseau et pour différentes valeurs du rapport cyclique. Le nombre de tentatives est fixé à huit, la charge utile à 50 octets, la distance à 1 km et la puissance à 14 dBm.

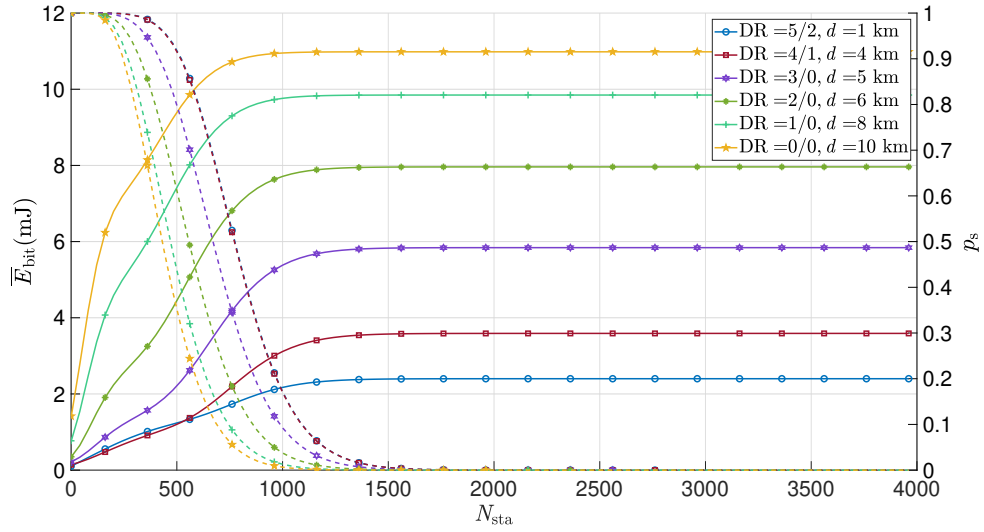


FIGURE 5.21 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différentes distances en fonction du nombre de nœuds dans le réseau (FPayload = 50 octets; NR = 8; $P_{ta} = 14$ dBm; $dc = 1$ %).

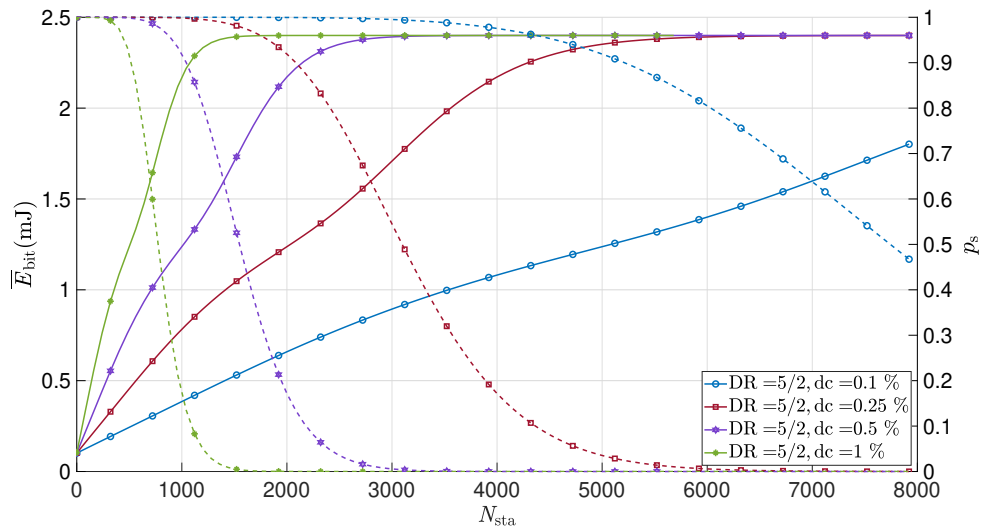


FIGURE 5.22 – Probabilité de transmission avec succès et énergie moyenne consommée par bit utile par un capteur LoRaWAN pour différents rapports cycliques en fonction du nombre de nœuds dans le réseau (FPayload = 50 octets; NR = 8; $P_{ta} = 14$ dBm; $d = 1$ km).

On constate que l'énergie consommée par un appareil augmente avec le nombre de nœuds dans le réseau. Les collisions, et donc la probabilité de retransmission, suivent exactement la même évolution. Elles entraînent une augmentation de la consommation d'énergie par bit utile. Une saturation est observée lorsque le nombre de capteurs dépasse 2000 dispositifs. La probabilité d'une transmission réussie devient très faible et le nombre de collisions trop élevé pour que le capteur puisse transmettre correctement ses données sans devoir faire plusieurs tentatives. Le

cycle de service a également un impact sur la consommation d'énergie. Le nombre de capteurs à partir duquel la saturation de la consommation est atteinte évolue avec ce ratio. Pour une valeur de 1%, le seuil est atteint à partir de 2000 nœuds ; pour une valeur de 0,5%, le même seuil est atteint à partir de 5000 nœuds ; pour une valeur de 0,25%, à partir de 8000 nœuds et au-delà pour un rapport cyclique de 0,1%.

5.5 Discussions et conclusion

L'optimisation de la consommation énergétique d'un réseau de capteurs passe par un ajustement précis des paramètres de transmission de chaque capteur. Dans un réseau LoRaWAN, l'équipement qui a une vue d'ensemble du fonctionnement du réseau est le serveur de réseau. Ce dernier peut utiliser les fenêtres de réception des capteurs pour leur transmettre des commandes MAC, afin de leur fournir une configuration pour la prochaine tentative de transmission. Le mécanisme ADR, via la commande *LinkADDRReq* permet de modifier le DR et la puissance de transmission du dispositif ; les commandes *DutyCycleReq*, *RXTimingSetupReq*, *RXParamSetupReq* et *NewChannelReq* permettent de modifier le cycle d'utilisation, les temps de veille et le canal utilisé ; la commande *DevStatusReq* permet d'interroger le dispositif sur son état de fonctionnement.

L'agrégation de données serait la première solution à adopter pour améliorer la consommation énergétique du protocole LoRaWAN. Elle permettrait de diminuer le cycle de service et d'augmenter la taille des trames de données, ce qui aurait pour effet de diminuer la consommation d'énergie par bit utile et le nombre de transmissions. Cependant, les spécifications LoRAWAN définissent une valeur maximale de charge utile pour chaque DR, ceci afin de limiter la durée des trames et le risque de collision. L'utilisation d'un codage de données efficace, tel que le senML ou le CBOR (*Concise Binary Object Representation*), permettrait d'agréger plusieurs charges de données dans une trame. La deuxième solution consisterait à réserver des canaux de transmission avec succès et à sélectionner le nombre de tentatives en fonction de la situation du dispositif dans le réseau. Les capteurs proches de la passerelle utilisent généralement un DR plus élevé, ils consomment donc moins d'énergie. Ils pourraient être amenés à utiliser les canaux où la densité de capteurs est la plus élevée et seraient autorisés à effectuer d'avantage de tentatives. Les capteurs plus éloignés auraient un accès privilégié aux canaux où la densité de capteurs est la moins élevée, minimisant ainsi les tentatives de transmission.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle de consommation d'énergie pour le protocole LoRa/LoRaWAN. Ce modèle est basé sur des mesures *in situ*. Il tient compte du nombre de

nœuds dans le réseau, de la probabilité de collision qui dépend de la densité des capteurs et du nombre de retransmissions. Des mesures en laboratoire ont été réalisées à l'aide d'un banc d'essai LoRaWAN qui comprend des capteurs, une passerelle et un serveur de réseau. Les résultats nous permettent ainsi de caractériser la consommation d'énergie et le temps passé par un capteur LoRaWAN dans chaque phase de communication.

Les résultats montrent l'influence du nombre de nœuds dans un réseau LoRaWAN sur la consommation énergétique d'un nœud. Cette consommation dépend également de la puissance de transmission, de la charge des trames de données, du nombre de retransmissions, de la distance et du rapport cyclique. Dans tous les cas, l'énergie consommée par bit utile atteint une valeur limite qui dépend du nombre total de nœuds dans le réseau. Cela démontre que le nombre de capteurs pouvant être intégrés dans un réseau LoRaWAN est limité en raison de la probabilité de collision.

COMPARAISON DES PROTOCOLES 802.11AH ET LoRa/LoRaWAN

Introduction

Dans les domaines de l’IoT, le trafic de données a un profil particulier et différent des réseaux classiques. Un réseau IoT peut être constitué de nombreux objets qui accèdent plus ou moins régulièrement au média pour transmettre de faibles quantités de données. Ce profil influence fortement l’efficacité énergétique des réseaux de capteurs et le choix du protocole de communication en est dépendant.

Dans ce chapitre, nous utilisons les deux modèles de consommation énergétique établis dans les chapitres 4 et 5 pour réaliser une comparaison et définir un cadre d’utilisation des protocoles Wi-Fi HaLow et LoRa/LoRaWAN. Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Une comparaison des protocoles est réalisée dans la partie 6.1. Les modèles de consommation énergétique sont utilisés dans la partie 6.2 pour déterminer la durée de vie d’un dispositif. Des discussions et une conclusion sont proposées dans la partie 6.3.

6.1 Comparaison des caractéristiques de transmission

Les figures 6.1, 6.2 et 6.3 représentent le débit de données de couche physique, la portée maximale et la durée d’un échange des protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN, pour différents paramètres de transmission. La durée d’un échange est déterminée en considérant les temps d’écoute avant transmission, les temps d’attente et de réception d’un ACK. Ces figures sont obtenues à partir des équations établies dans les chapitres 2, 3, 4 et 5.

Sur ces figures, on remarque que les deux protocoles ont des caractéristiques très différentes. Sur la figure 6.1, le débit de couche physique du protocole LoRa varie entre 0,3 et 5,5 kbit/s et entre 150 et 3300 kbit/s pour le protocole 802.11ah. Sur la figure 6.2, la durée d’un échange LoRaWAN varie entre 1,078 s et 1,44 s pour le DR5 et entre 2,98 s et 4,29 s pour le DR0. La durée d’un échange du protocole 802.11ah varie entre 20,15 ms et 21,08 ms pour le MCS7 et entre 25,40 ms et 44,06 ms pour le MCS10. La charge maximale du protocole LoRaWAN est égale à 242 octets pour le DR5 et 50 octets pour le DR0. La charge maximale du protocole

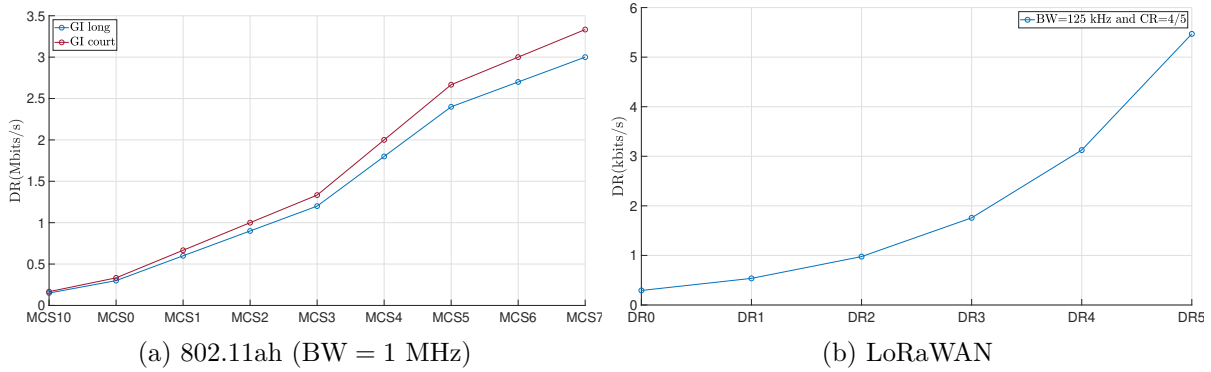


FIGURE 6.1 – Débit binaire des protocoles LoRaWAN et 802.11ah en fonction du schéma de modulation et de codage.

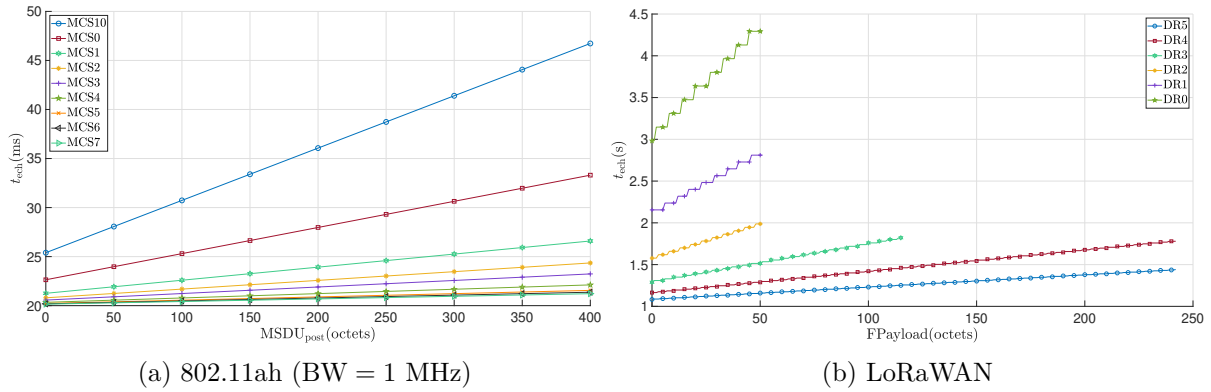


FIGURE 6.2 – Durée d'un échange complet des protocoles LoRaWAN et 802.11ah en fonction de la charge utile transportée.

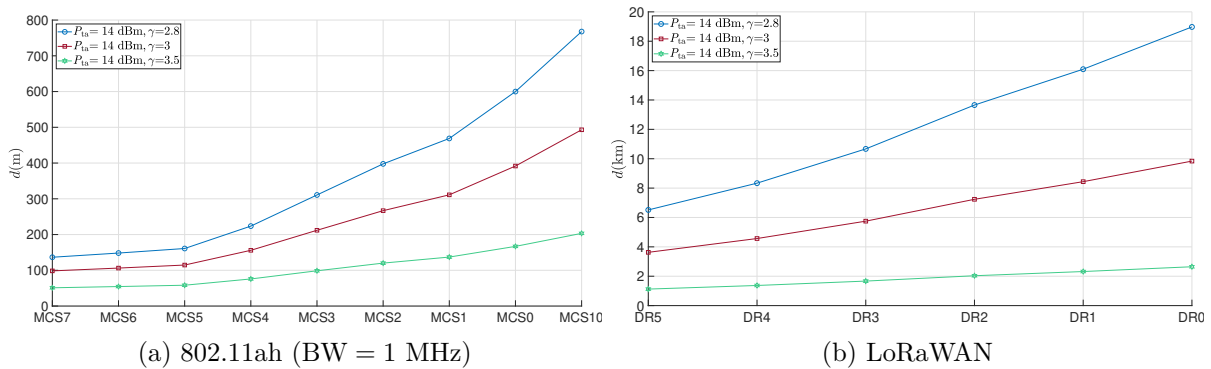


FIGURE 6.3 – Portée maximale des protocoles LoRaWAN et 802.11ah en fonction du schéma de modulation et de codage.

802.11ah est égale à 445 octets sans mécanisme d'agrégation. A partir de ces résultats, il est possible de déterminer le débit de données de couche applicative en divisant la charge utile par le temps d'un échange. Pour le protocole LoRaWAN, le débit maximum est égal à 1,34 kbit/s avec une charge utile de 242 octets et un DR5. Il est égal à 93,24 bit/s pour un DR0 et une charge utile de 50 octets. Le débit maximum de couche application du protocole 802.11ah est égale à 132,82 kbit/s pour le MCS7 et 63,54 kbit/s pour le MCS10. Enfin, sur la figure 6.3, la portée maximale du protocole LoRa est estimée à 20 km en milieu rural ($\gamma=2,8$), 10 km en milieu semi-urbain ($\gamma=3$) et 2,5 km en milieu urbain ($\gamma=3,5$). La portée du protocole 802.11ah est plus faible et atteints 770 m en milieu rural, 500 m en milieu semi urbain et 200 m en milieu urbain.

6.2 Comparaison de la consommation énergétique

6.2.1 Comparaison des dispositifs utilisés dans les expériences

Les modèles de consommation énergétique des chapitres 4 et 5 sont basés sur des mesures réalisées sur des bancs de test. Le tableau 6.1 synthétise les caractéristiques physiques des équipements utilisés pour réaliser ces mesures. Ces dispositifs sont très similaires. Le capteur LoRa est constitué d'une carte STM32L073 et d'un *shield* sx1272mb2das. La carte STM32L073 a été conçu pour consommer une très faible quantité d'énergie et faciliter les démarrages rapides (<10 ms) [215]. Le capteur 802.11ah est un dispositif d'évaluation et de test qui contient un SoC 802.11ah. La puce NRC-7292 a également un temps de démarrage très court pour recevoir les trames TIM, mais ce temps s'allonge lorsqu'il faut démarrer la pile protocolaire TCP/IP pour transmettre des données [152, 171]. La référence [198] propose un autre modèle de consommation énergétique pour le protocole LoRaWAN que nous avons choisi d'intégrer à notre comparaison. Ce modèle est basé sur des mesures réalisées sur une carte *mDot-868* [219].

6.2.2 Énergie consommée par phase de réveil

La figure 6.4 représente l'énergie consommée par un capteur 802.11ah et un capteur LoRaWAN en fonction de la charge utile transmise pendant une phase de réveil. Les courbes sont tracées en tenant compte du démarrage du dispositif et d'un échange complet avec accusé de réception. La charge utile varie entre 50 et 242 octets pour le capteur LoRaWAN et entre 50 et 445 octets pour le capteur 802.11ah. La portée maximale du protocole 802.11ah en milieu semi-urbain et avec une puissance de 14 dBm est estimée à environ 450 m. Les courbes sont donc tracées avec un DR5 pour le LoRa et avec les MCS7 et 10 pour le 802.11ah.

Sur la figure 6.4, l'efficacité énergétique est clairement en faveur de la solution LoRaWAN avec la carte STM32L073RZ, et ce pour une charge utile inférieure à 242 octets. La solution LoRaWAN avec la carte *mDoT-868* est plus efficace que le protocole 802.11ah pour une charge

TABLEAU 6.1 – Caractéristiques physiques des équipements IoT utilisés dans les expériences.

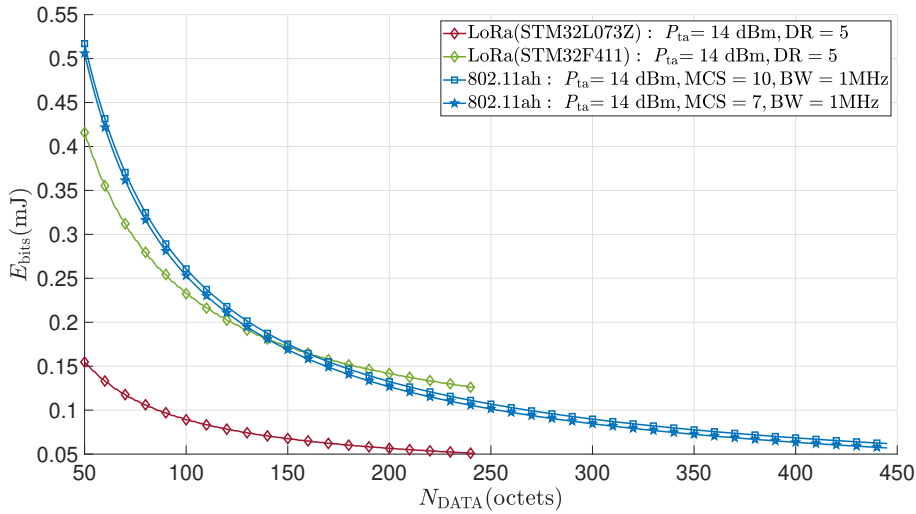
Caractéristiques	(STM32L073RZ +sx1272mb2das)	SX-newAH (NRC-7292)	mDot-868 (STM32F411RET)
Protocole de transmission	LoRa	802.11ah	LoRa
CPU ¹	Cortex M0+ 32 MHz 32-bit RISC ²	Cortex M0/M3 48 MHz 32-bit RISC	Cortex M4 100 MHz 32-bit RISC
Flash, SRAM, EEPROM	192 ko, 20 ko, 6 ko	32 ko, 752 ko, 32 ko	512 ko, 128 ko, •
Interfaces	I2C, SPI, UART ³	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART
GPIO / ADC ⁴	51 / 16 (16 bits)	54 / 4 (10 bits)	81 / 16 (12 bits)
Alimentation	1,8 à 3,6 V	3,3 V ± 5%	1,7 V à 3,6 V
Températures	-40 à 125°C	-40 à 85°C	-40°C à 125°C

1 Central Processing Unit

2 Reduced Instruction Set Computer

3 Universal Asynchronous Receiver Transmitter

4 Analog Digital Converter


 FIGURE 6.4 – Comparaison de l'énergie consommée par bit utile des protocoles LoRa et 802.11ah lors d'un échange complet ($P_{\text{ta}} = 14 \text{ dBm}$; $d \in [0, 450 \text{ m}]$).

inférieure à 140 octets. Pour une charge de 50 octets, les capteurs LoRa et 802.11ah consomment respectivement 0,15, 0,41 et 0,51 mJ/bit utile transmis. Pour une charge de 242 octets, l'énergie consommée est égale à 0,05, 0,126 et 0,11 mJ/bit utile transmis. Enfin, pour une charge de 445 octets, qui est la taille maximale sans mécanisme d'agrégation, le capteur 802.11ah consomme 0,06 mJ/bit utile transmis. Cette énergie devient inférieure à 0,05 mJ/bit utile lorsque le capteur 802.11ah utilise le mécanisme d'agrégation et transmet plus de 550 octets. Le choix de l'équipement qui supporte les transmissions a un impact important sur la consommation énergétique de

l'objet et ce indépendamment du protocole de communication choisi. Les processeurs *Cortex M3* et *Cortex M4* ont une puissance de calcul plus conséquente et ont donc un fort impact en terme de consommation énergétique. En considérant les équipements utilisés sur nos bancs de test et pour des distances inférieures à 1 km, le protocole 802.11ah devient intéressant d'un point de vue énergétique si la charge utile dépasse les 242 octets.

6.2.3 Durée de vie d'un objet connecté

En IoT, le trafic de données peut être classé en trois catégories : le trafic à fort volume de données (mesures biométriques, vidéo, etc), le trafic périodique en provenance de compteurs intelligents (mesures physiques, etc) et le trafic *Ad'Hoc* généré par des événements (alarmes, alertes, notifications, etc). Les modèles de consommation énergétique des chapitres 4 et 5 répondent aux problématiques de la deuxième catégorie. Il s'agit le plus souvent d'envoyer de petites quantités de données à intervalle de temps régulier. La taille du réseau dépend de la zone à couvrir et les mesures physiques sont réalisées à partir de capteurs au sol, de stations météorologiques ou de compteurs intelligents.

La figure 6.5 représente la durée de vie du capteur LoRaWAN (STM32L073RZ) et du capteur 802.11ah en fonction de la charge utile transmise. Les caractéristiques du trafic de données sont une synthèse des articles déjà cités dans les chapitres précédents [101, 115, 142, 197, 220-226] et la durée de vie est obtenue en utilisant une batterie au Lithium de 2 000 mAh et les modèles de consommation énergétique des chapitres 4 et 5. La durée de vie d'un capteur LoRaWAN est tracée en pointillé et celle d'un capteur 802.11ah en trait plein, en considérant une probabilité de transmission avec succès supérieure à 90% (équations (5.30) et (4.22)).

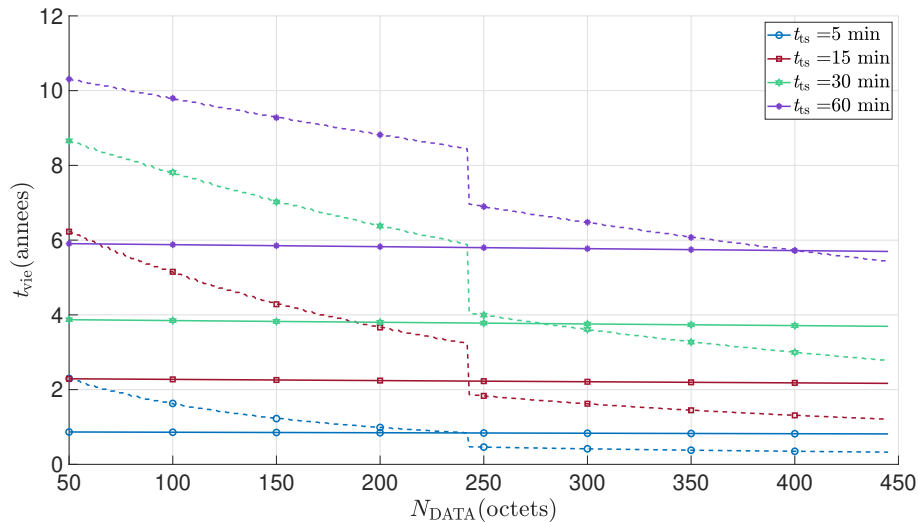


FIGURE 6.5 – Comparaison de la durée de vie d'un équipement LoRaWAN et 802.11ah lors d'un échange complet ($P_{ta} = 14$ dBm ; $d = 450$ m, NR = 4, $N_{sta} = 200$).

La durée de vie d'un capteur LoRaWAN diminue lorsque la charge utile augmente et celle d'un capteur 802.11ah reste quasiment constante. Lorsque la charge dépasse les 242 octets, le capteur LoRaWAN doit transmettre deux trames consécutives tout en respectant le rapport cyclique de 1%, ce qui a pour effet de diminuer fortement sa durée de vie. Sur la figure 6.5, le nombre de tentatives est configuré à 4 pour couvrir les DR4 et 5 du protocole LoRaWAN, la valeur maximale de la charge utile est donc égale à 242 octets. Avec le DR3, cette valeur serait de 115 octets, et avec les DR0, 1 et 2, elle était égale à 51 octets. La durée de vie d'un capteur LoRaWAN est supérieure à celle d'un capteur 802.11ah lorsque la charge utile est inférieure à 242 octets pour le DR5 et un cycle de service de 5 ou 15 min. La limite est atteinte lorsque la charge utile dépasse les 277 octets pour un cycle de service de 30 min et 400 octets pour un cycle de service de 60 min.

6.3 Discussions et conclusion

Les protocoles LoRa/LoRaWAN et 802.11ah fonctionnent dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz, ce qui permet d'augmenter leur portée de transmission. Le protocole LoRa peut couvrir plusieurs kilomètres de distance, là où le protocole 802.11ah ne couvre que quelques centaines de mètres. Le protocole LoRa/LoRaWAN a une charge utile limitée à 51 octets pour les DR les plus faibles qui correspondent également aux distances les plus élevées. Le débit de données ne dépasse pas quelques kbit/s, ce qui est suffisant pour le raffinage de données mais insuffisant pour assurer les applications à fort volume de données. De son côté, le protocole 802.11ah a l'avantage d'avoir des débits et une charge utile plus élevés. La durée d'un échange est de quelques millisecondes pour le protocole 802.11ah et quelques secondes pour le protocole LoRaWAN. D'un point de vue énergétique, à distance équivalente, le protocole 802.11ah offre une meilleure efficacité lorsque la quantité de données à transmettre est importante ou lorsque le cycle de service est faible.

Le choix entre ces deux technologies dépend donc des besoins de l'application IoT. Pour de petites quantités de données avec des transmissions sporadiques, le protocole LoRa peut convenir, mais les applications avec davantage de données telles que la vidéo ou les mises à jour logicielles feront du Wi-Fi HaLow une option plus évidente. Si on intègre à la consommation énergétique, d'autres besoins tels que la pérennité du réseau, la facilité de déploiement, la latence ou la sécurité des transmissions, la prise de décision devient plus difficile. La norme 802.11ah intègre nativement une pile TCP/IP, ce qui facilite le routage des objets communicants sur Internet et permet l'intégration de mécanismes de sécurité robustes tel que le SSL/TLS. De plus, le protocole Wi-Fi HaLow peut répondre à certaines applications exigeantes en terme de latence, comme la détection des incendies ou le contrôle de processus industriels en boucle fermée (classe 2 et 3 des domaines de l'industrie). La connaissance du modèle de trafic ou de l'application qui génère

le trafic peut considérablement aider à optimiser le modèle de consommation énergétique. Les mécanismes d'économie d'énergie permettent également d'améliorer l'efficacité mais ils peuvent réduire les performances du réseau. Il y a donc un compromis à réaliser entre les différentes métriques et l'efficacité énergétique.

Cependant, il existe certaines applications, telles que la gestion des réseaux de distribution d'énergie, où la diversité des caractéristiques de l'emplacement (alimentation et connexions internet) et les exigences des capteurs (débit de données, bidirectionnalité) rendent impossible l'utilisation d'une technologie unique. Dans ces cas, deux technologies aux propriétés différentes, telles que le LoRa/LoRaWAN et le Wi-Fi HaLow, peuvent être combinées pour réaliser une architecture de communication hybride.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé les caractéristiques et la consommation énergétique des protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN. Les deux modèles de consommation d'énergie développés dans les chapitres 4 et 5 sont utilisés pour estimer et comparer la durée de vie d'un capteur LoRa/LoRaWAN et d'un capteur 802.11ah.

Ces deux protocoles peuvent être utilisés pour collecter des données et les résultats mettent en avant leurs particularités. D'un point de vue énergétique, le protocole LoRa/LoRaWAN est à privilégier lorsque la quantité de données à transmettre est faible, que les temps de réveil et de latence sont longs, ou que la distance est supérieure au kilomètre. Le protocole Wi-Fi HaLow offrira des temps de latence plus courts, un débit plus élevé et une meilleure efficacité énergétique pour les grandes quantités de données. Les caractéristiques de transmission et la configuration du réseau peuvent avoir un impact important sur les métriques et la consommation énergétique des capteurs du réseau. Une bonne connaissance du trafic de données est nécessaire pour évaluer avec pertinence cette consommation et les modèles développés au chapitre 4 et 5 peuvent aider à évaluer et optimiser la consommation énergétique d'un réseau de capteurs.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

L'IoT est un domaine complexe qui intègre différentes technologies du numérique, afin d'assurer la connexion d'objets à des réseaux de collecte, de traitement et de stockage des données. En raison de leurs diversités et de leurs complexités, ces réseaux d'objets sont confrontés à des défis colossaux, tels que la couverture géographique, le nombre d'équipements et la consommation énergétique. Les technologies traditionnelles ne peuvent pas répondre à toutes ces problématiques, ce qui rend nécessaire le développement et la maîtrise de nouveaux protocoles de communication.

Dans ces travaux, nous nous sommes intéressés au protocole 802.11ah puis au protocole LoRaWAN. Le premier objectif était de définir le concept d'IoT et de circonscrire ainsi le sujet. Nous nous sommes également appropriés une modélisation du fonctionnement des réseaux IoT, afin de présenter et de comparer les principaux protocoles de communication. Après avoir réalisé cette comparaison, nous avons pris le parti de réduire notre étude aux deux protocoles susmentionnés.

Le premier protocole à avoir été étudié est le protocole Wi-Fi HaLow. La présentation de ses caractéristiques, de ses méthodes d'accès au média et de ses mécanismes d'économie d'énergie nous a permis de le définir dans toutes ses composantes. Cette synthèse préliminaire est une étape importante.

Elle nous a aidé par la suite à mettre en place un banc de test composé d'un émetteur et d'un récepteur 802.11ah, ce qui n'avait pour l'heure jamais été fait. La liaison a été qualifiée au moyen de ce banc de test, en terme de latence, de débit et de taux d'erreurs de paquet. Ces métriques ont été comparés à des modèles théoriques, ce qui a rendu possible l'élaboration de deux modèles de propagation et la validation d'un modèle de probabilité d'erreurs de transmission. Cette qualification est la première réalisée avec du matériel en conditions réelles et elle répond à un besoin exprimé de nombreuses fois dans la littérature.

La suite de nos travaux s'est intéressée à l'étude et à la modélisation de la consommation énergétique d'une station 802.11ah. Avant de procéder à la qualification de la consommation d'énergie, nous avons développé des solutions originales pour utiliser le seul matériel actuellement disponible sur le marché et l'intégrer dans un écosystème IoT complet. Les mesures ont permis de proposer un modèle de consommation énergétique qui prend en compte les différentes couches de communication et la complexité d'un environnement IoT. Ce modèle a également été confronté

à un simulateur initialement développé sous Matlab que nous avons adapté aux transmissions Wi-Fi HaLow.

Enfin, nous avons proposé un modèle de consommation énergétique pour le protocole LoRaWAN, afin de le comparer au Wi-Fi HaLow et de définir un cadre d'utilisation pour ces deux solutions. Ce modèle basé sur des mesures *in situ* se révèle plus réaliste dans la mesure où il prend en compte un nombre plus important de paramètres tels que le nombre de nœuds dans le réseau, la probabilité de collision et les principales recommandations de la norme LoRaWAN.

Ce faisant, nous avons comparé les caractéristiques et la consommation énergétique des protocoles 802.11ah et LoRa/LoRaWAN, pour en déduire la durée de vie d'un capteur utilisant ces technologies dans son environnement.

Nos travaux démontrent que le protocole Wi-Fi HaLow est une norme unique et ouverte qui peut répondre à de nombreuses applications IoT. Ce protocole associe à l'efficacité énergétique la portée, la robustesse, l'évolutivité et la sécurité, caractéristiques essentielles pour des applications IoT. Les transmissions dans des bandes de fréquences inférieures à 1 GHz et l'utilisation de canaux plus étroits permettent au Wi-Fi HaLow d'offrir une portée largement supérieure à celle des réseaux Wi-Fi classiques. Ses caractéristiques offrent également une robustesse suffisante pour traverser les matériaux de construction, sans maillage du réseau. Le protocole Wi-Fi HaLow peut gérer efficacement les réseaux de capteurs dans des environnements très variés. Il possède le débit le plus élevé et la latence la plus faible de toutes les solutions IoT existantes. Il peut facilement être intégré aux réseaux Wi-Fi existants, prend nativement en charge les couches TCP/IP et intègre les dernières avancées en matière de sécurité. Le protocole Wi-Fi HaLow a également la capacité d'effectuer des mises à jour efficaces et sécurisées par voie aérienne, minimisant ainsi le temps d'arrêt des équipements et l'utilisation d'un autre réseau pour effectuer ces tâches.

Perspectives

Nos travaux offrent des perspectives que nous classons dans deux catégories : 1) les améliorations à apporter à nos modèles de consommation énergétique et 2) les perspectives de recherche en terme d'efficacité énergétique ou de communications IoT.

Les modèles de consommation énergétique proposés dans les chapitres 4 et 5 ont été développés en considérant un trafic de données en voie montante, uniquement. Il serait intéressant de modéliser un trafic en voie descendante, en tenant compte du fait que la passerelle ou le point d'accès a un rôle central dans un réseau IoT. De plus, le trafic de données est modélisé à l'aide d'un processus de *Poisson*. Avec ce type de modélisation, les temps d'arrivée sont distribués de manière exponentielle. Les processus de *Poisson* sont largement utilisés car ils constituent une description satisfaisante de la réalité. Cependant, des outils mathématiques plus complexes, tels

que les distributions de *Weibull* et de *Pareto*, offriraient une modélisation plus réaliste d'un trafic de données IoT [227-229]. Il serait également intéressant de modéliser un trafic différent pour chaque type de stations, d'y ajouter la gestion de l'agrégation et de la QoS, et de remplacer les modèles de propagation afin de mieux représenter la complexité de l'environnement d'un réseau IoT.

Nos travaux ouvrent la voie à des perspectives de recherche dans le domaine des communications IoT. Tout d'abord, il serait envisageable d'utiliser nos modèles de consommation énergétique pour déterminer les paramètres de configuration du réseau, avec pour principal métrique la consommation énergétique. Ces modèles pourraient également participer à l'élaboration d'algorithmes d'optimisation qui transmettraient à chaque capteur un jeu de paramètres pour les prochaines transmissions. Enfin, nos modèles pourraient servir à valider l'impact de nouvelles solutions sur la consommation énergétique. Parmi ces solutions, l'intégration d'une architecture maillée ou l'ajout d'un *Midamble* tous les 10 ou 20 symboles OFDM augmenteraient la portée du protocole 802.11ah. La compression des en-têtes de couches supérieures (6Lo, MQTT-SN, SCHC (*Static Context Header Compression*)) pourraient minimiser l'occupation du média et donc diminuer les risques de collision. L'intégration de mécanismes TSN (*Time Sensitive Networking*) améliorerait la latence afin de garantir des applications à temps réel. Le gain de ces solutions devrait être comparé au coût de leurs traitements, et nos modèles pourraient aider à les valider d'un point de vue énergétique. Enfin, un certain nombre de mécanismes d'accès au média du Wi-Fi HaLow sont identiques à ceux utilisés dans le Wi-Fi 7. Les prochaines solutions Wi-Fi intégreront sûrement des systèmes tri-bandes avec une couche MAC unique. Les canaux de transmissions seront répartis en fonction des applications. Les applications avec un besoin en faible latence seraient ainsi assurées sur la bande des 6 GHz et les applications avec des besoins en terme de portée utiliseraient les bandes de fréquences inférieures à 1 GHz. Le Wi-Fi HaLow remplirait alors un rôle similaire au NB-IoT dans la 5G.

UTILISATION DE LA BANDE DE FRÉQUENCES EU-868

Les transmissions sans fil doivent respecter des réglementations définies par bandes de fréquences utilisées dans les différentes régions du monde. En Europe, la bande EU-868 est qualifiée pour cinq types d'applications : les applications RFID, à large bande, à cycle de fonctionnement élevé ou à transmission continue, à faible charge et à haute fiabilité, et une catégorie d'applications non spécifiées. La figure A.1 représente le découpage de la bande de fréquences EU-868, comprise entre 863 et 870 MHz.

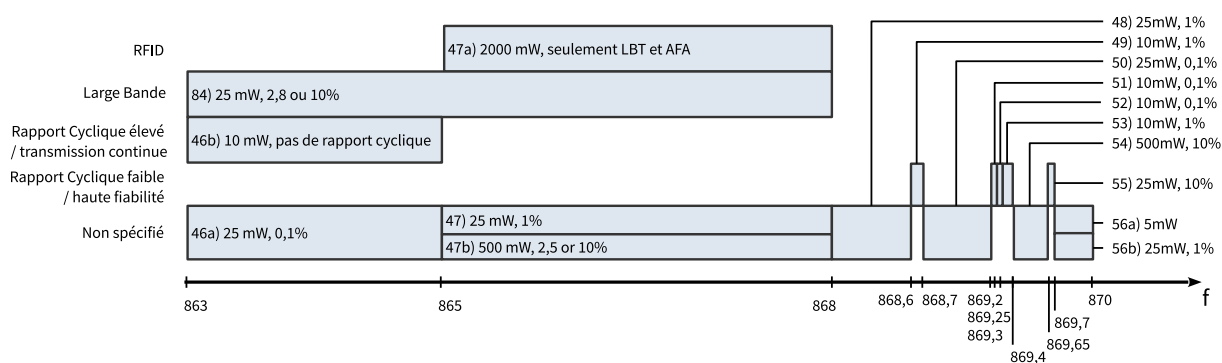


FIGURE A.1 – Découpage et limitations des bandes de fréquences EU-868, allant de 863 à 870 MHz

Les limites sont imposées sous la forme d'un rapport cyclique, d'une limitation en puissance et/ou d'une restriction polie d'accès au média. La figure A.2 donne un aperçu de l'utilisation de cette bande de fréquences par différentes technologies IoT.

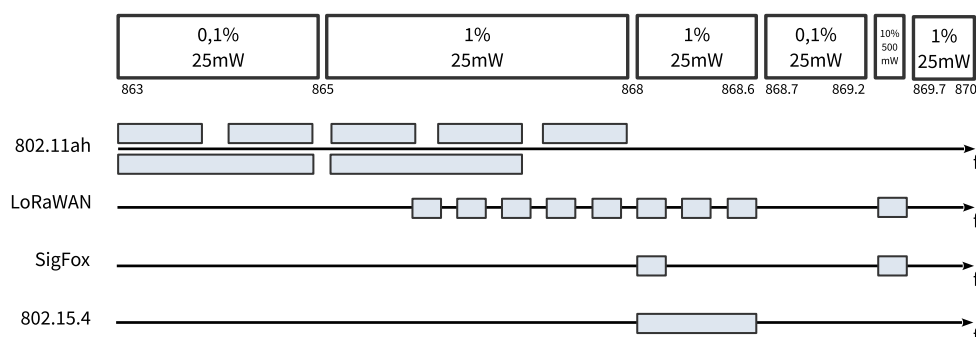


FIGURE A.2 – Utilisation de la bande de fréquences EU-868 allant de 863 à 870 MHz par différentes technologies IoT

Pour être autorisés à utiliser la limite assouplie du rapport cyclique, les dispositifs doivent mettre en œuvre deux mécanismes d'accès poli au média. Le mécanisme LBT (*Listen Before Talk*) impose au dispositif d'écouter le support avant de réaliser une transmission et le mécanisme AFA (*Adaptive Frequency Agility*) impose au dispositif d'attendre un intervalle de recul aléatoire ou de changer de fréquence si le support est occupé. Lorsque ces deux mécanismes sont mis en œuvre, le rapport cyclique est ramené à 100 secondes de temps de transmission cumulé par heure, ce qui correspond à un rapport cyclique de 2,7%. Les dispositifs doivent également respecter d'autres restrictions. La vérification de l'accès au média par un mécanisme CCA doit avoir une durée minimale de 160 μ s. Le dispositif doit attendre un délai inférieur à 5 ms avant de pouvoir commencer sa transmission. La transmission ne doit pas excéder 1 à 4 s selon le type de transmission, continue ou par salve. Après la transmission, l'équipement n'a pas le droit d'émettre sur cette fréquence pendant au moins 100 ms. La figure A.3 représente le fonctionnement de cette restriction.

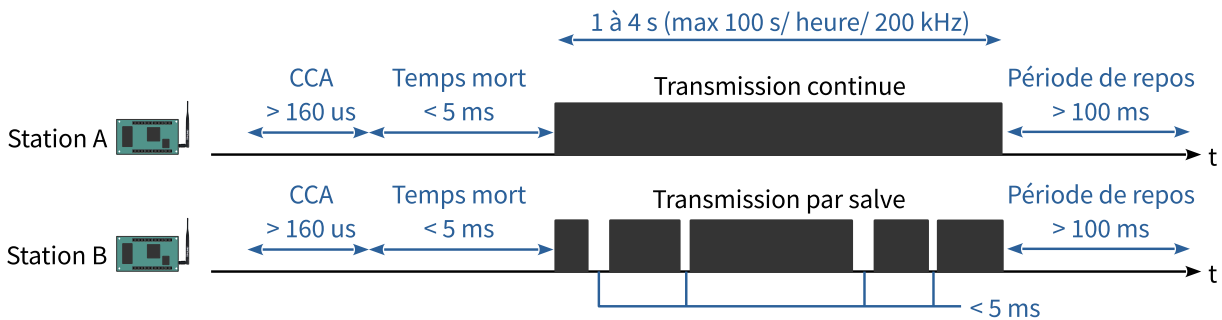


FIGURE A.3 – Techniques d'accès au média avec politesse.

CALCUL DE LA SURFACE OCCUPÉE PAR LES STATIONS 802.11AH EXPOSÉES ET CACHÉES

Une lune est une figure plane délimitée par deux arcs de cercle de rayons inégaux. Pour une station 802.11ah, la proportion de stations cachées et de stations exposées peut être déterminée en calculant l'aire d'une lune. Sur la figure B.1, le point d'accès est positionné en O_{AP} et la station en O_{STA} . Les deux équipements sont séparés par la distance d_{sta} . La station a un rayon de détection des transmissions 802.11ah noté d_{csr} et les autres stations sont situées dans un d_{rx} du point d'accès, en fonction du MCS utilisé. Pour la station positionnée en O_{STA} , la zone bleue correspond aux stations exposées et la zone rouge aux stations cachées. La répartition des stations autour de l'AP a une densité uniforme, le nombre de stations cachées et exposées est donc directement lié à la surface de ces zones.

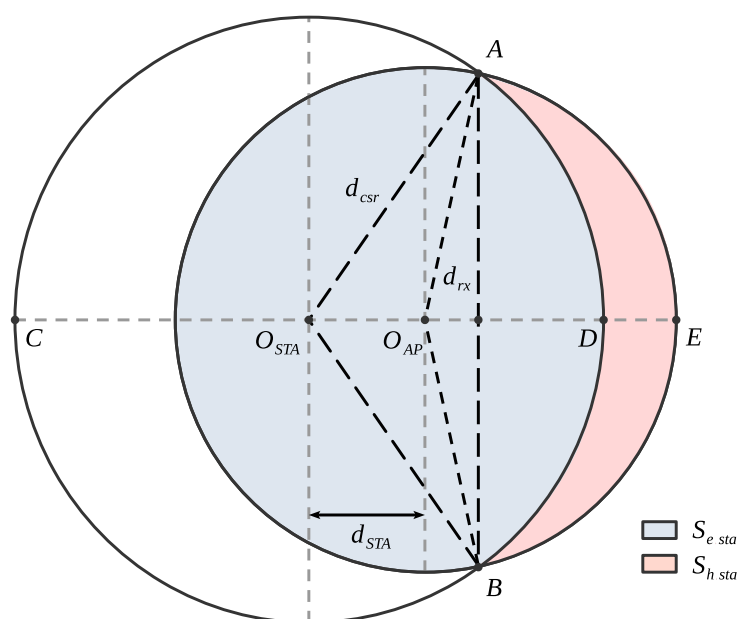


FIGURE B.1 – Représentation de la surface occupée par les stations cachées et les stations exposées, pour un MCS quelconque.

Pour des cercles de rayon d_{rx} et $d_{csr} > d_{rx}$ dont les centres sont séparés par une distance d_{sta} , l'aire $S_{h,sta}$ est donnée par l'équation suivante (B.1) :

$$S_{h.sta} = 2 \cdot \Delta + d_{rx}^2 \cdot \sec^{-1} \left(\frac{2 \cdot d_{rx} \cdot d_{sta}}{d_{csr}^2 - d_{rx}^2 - d_{sta}^2} \right) - d_{csr}^2 \cdot \sec^{-1} \left(\frac{2 \cdot d_{csr} \cdot d_{sta}}{d_{csr}^2 + d_{sta}^2 - d_{rx}^2} \right), \quad (B.1)$$

où Δ est l'aire du triangle dont les côtés sont les longueurs d_{sta} , d_{rx} et d_{csr} . La valeur de Δ est obtenue par l'équation suivante (B.2) :

$$\Delta = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(d_{rx} + d_{csr} + d_{sta}) \cdot (d_{csr} + d_{sta} - d_{rx}) \cdot (d_{rx} - d_{csr} + d_{sta}) \cdot (d_{rx} + d_{csr} - d_{sta})}, \quad (B.2)$$

Dans cette étude, on considère que les stations sont équitablement réparties autour de l'AP, avec une densité constante. Le nombre de stations exposées et le nombre de stations cachées sont donc obtenues par les équations (B.3) et (B.4) :

$$N_{e.sta,mcs} = \frac{S_{e.sta,mcs}}{A_{rx,mcs}} \cdot N_{sta,mcs}, \quad (B.3)$$

$$N_{h.sta,mcs} = \frac{S_{h.sta,mcs}}{A_{rx,mcs}} \cdot N_{sta,mcs}. \quad (B.4)$$

$A_{rx,mcs}$ correspond à l'aire occupée par les STA qui utilisent un certain MCS. La densité de STA étant constante, la valeur $N_{sta,mcs}$ est obtenue en multipliant l'aire occupée par la densité de STA.

MÉCANISMES D'OPTIMISATION DU TAUX D'OCCUPATION DU CANAL

La figure C.1 représente le format des en-têtes de couche MAC. L'en-tête PV0 est le format d'origine, qui peut être utilisé par le Wi-Fi HaLow. L'en-tête PV1 est un format compressé spécifiquement développé pour le Wi-Fi HaLow, avec pour objectif de diminuer le taux d'occupation temporel des trames. L'en-tête PV0 est constituée de quatre adresses MAC, un champ *Frame Control* (FC), un champ *Sequence Control* (SC), un champ *Duration* et un champ pour les fonctionnalités QoS. Les adresses MAC sont codées sur 6 octets et la présence des adresses 3 et 4 dépend de l'état de la communication et des trames échangées. Le champ HT (*High Throughput*) n'est pas représenté sur la figure C.1. Il est présent uniquement pour les normes 802.11n et 802.11ac. L'en-tête PV1 est compressée. Elle est constituée de deux adresses MAC, un champ *Frame Control* (FC) et un champ *Sequence Control*. Les adresses MAC sont codées sur 6 octets et l'AID sur 2 octets.

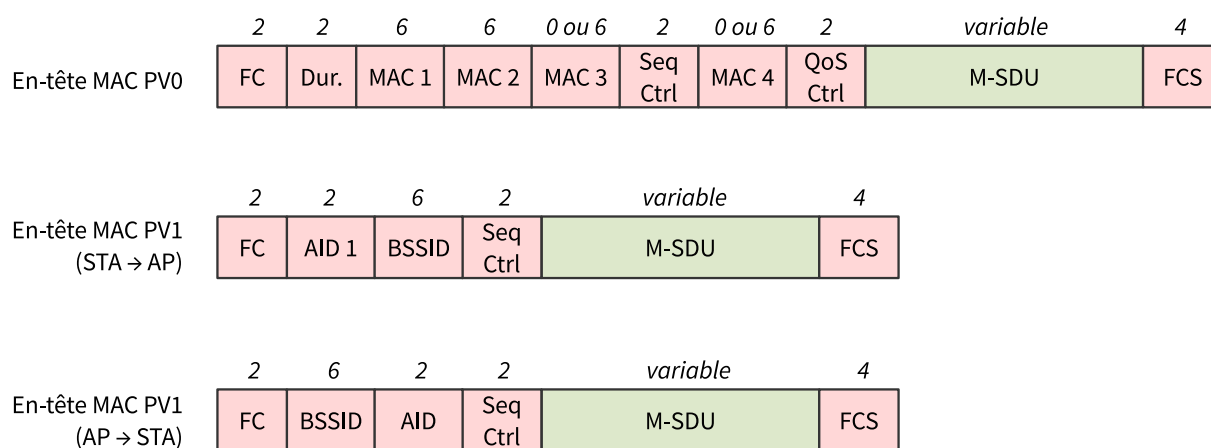


FIGURE C.1 – Formats des en-têtes MAC du protocole Wi-Fi

La longueur de l'en-tête PV0 est 1 à 3 fois supérieure à celle du format PV1. Le format PV1 est implémenté dans la solution *Newracom* mais il n'est pas utilisé pour des raisons de sécurité. Le champ *Duration* permet d'activer et de paramétrer le mécanisme NAV. Il est absent des en-têtes PV1. Pour répondre à cette problématique, les informations ont été déplacées dans le champ PLCP de l'en-tête de couche physique. Le champ RID contient 2 bits qui permettent aux autres stations de déterminer le temps d'attente avant de retenter une transmission. La figure C.2 représente un échange avec le mécanisme RID.

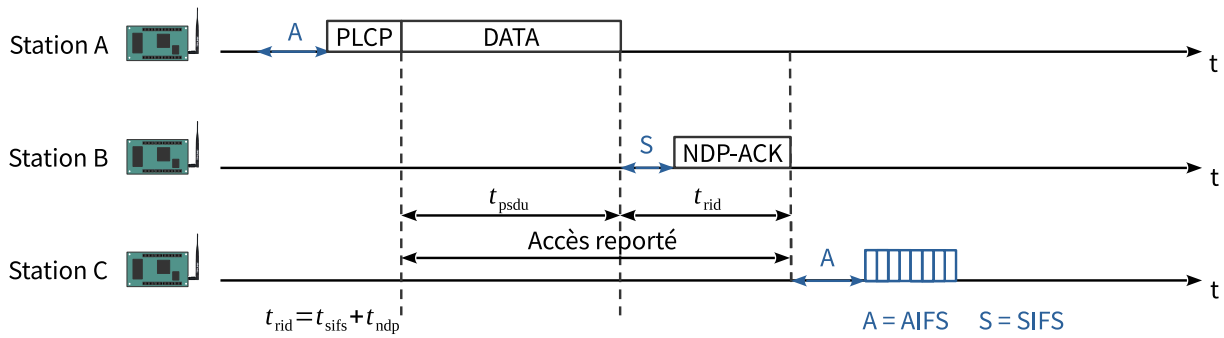


FIGURE C.2 – Accès au média avec le mécanisme RID

Sur la figure C.2, la station C est à l'écoute lorsque la station A transmet une trame. Le champ RID se trouve dans l'en-tête PLCP de couche physique. La station C reporte sa tentative d'accès au média après un temps t_{rid} , qu'elle active à la fin de la trame de la stations A. Ce mécanisme permet de protéger la transmission de la trame ACK transmise par la station B.

DÉTERMINATION DE LA PROBABILITÉ D'ABANDON D'UNE TRAME AU NIVEAU DE LA PASSERELLE LORAWAN

Une passerelle LoRa équipée d'un circuit SX1301 est capable de démoduler 8 trames LoRa et de détecter 48 préambules, simultanément. La fonction de détection est séparée de la démodulation et le circuit SX1301 se verrouille sur une trame lorsqu'il reçoit 4 symboles consécutifs de préambule. Dans cette étude, on considère que le canal est capturé si le signal est au dessus d'un seuil de réception Γ_i . Le tableau D.1 contient la valeur des seuils pour chaque SF.

TABLEAU D.1 – Seuil de détection des signaux en fonction du SF

SF _i	7	8	9	10	11	12
Γ_i (dB)	-6	-9	-12	-15	-17,5	-20

On considère également que les différents SF sont attribués aux nœuds selon un schéma basé sur des couronnes circulaires. Chaque couronne commence à la distance radiale l_{i-1} du centre de la cellule et va jusqu'à l_i , de sorte que $l_{12} = R$. i correspond à l'indice du SF. La probabilité de capter le canal est donc liée à la couverture $CP_{pre,i}$ qui peut être déterminée comme suit :

$$CP_{pre,i} = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \exp\left(-\frac{\Gamma_i \cdot r^\gamma}{\frac{P_{ta}}{P_{ra} \cdot 2^i} \cdot \left(\frac{c}{4\pi \cdot f}\right)^2}\right) \cdot p_i \cdot \frac{2r}{R^2} dr, \quad (D.1)$$

Le FDP est évalué à l'aide d'une fonction de distribution cumulative du nombre de trames reçues par le démodulateur SX1301 à un instant donné, à partir de l'équation suivante () :

$$L_M = \sum_{i=7}^{12} N_{sta} \cdot p_i \cdot \lambda \cdot t_{tx,i} \cdot CP_{pre,i}, \quad (D.2)$$

où L_M représente la somme du nombre de trames reçues pour chaque SF. La probabilité que les huit entrées du circuit ne soient pas occupées au moment de la réception d'une trame est obtenue avec l'équation suivante :

$$FDP = 1 - e^{-L_M} \cdot \sum_{k=0}^7 \frac{(L_M)^k}{k!}, \quad (D.3)$$

où k correspond aux nombres d'entrées du circuit SX1301.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revues internationales avec comité de lecture :

1. S. Maudet, G. Andrieux, R. Chevillon, and J.-F. Diouris, "Evaluation and Analysis of the Wi-Fi HaLow Energy Consumption," *IEEE Internet of Things Journal*, accepté à paraître.
2. S. Maudet, G. Andrieux, R. Chevillon, and J.-F. Diouris, "Practical Evaluation of Wi-Fi HaLow Performance," *Internet of Things*, Vol. 24, p. 100957, Dec. 2023, doi:10.1016/j.iot.2023.100957.
3. S. Maudet, G. Andrieux, R. Chevillon, and J.-F. Diouris, "Refined Node Energy Consumption Modeling in a LoRaWAN Network," *Sensors*, Vol. 21, Issue 19, p. 6398, Oct. 2021, doi:10.3390/s21196398.

BIBLIOGRAPHIE

1. STATISTA, *Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025* <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/> (2023).
2. ITU, *Internet of Things (IoT)* https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Africa/Documents/PRIDA%202020%20-%20ONLINE%20Capacity%20building%20%26%20digital%20services/FR_Workshop_Slides.pdf (2024).
3. IEEE, *Internet of Things (IoT)* <https://iot.ieee.org/definition.html> (2024).
4. IETF, *Internet of Things (IoT)* <https://www.ietf.org/topics/iot/> (2024).
5. COMMISSION, E., *The next generation Internet of Things* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/next-generation-internet-things> (2023).
6. STATISTA, *Internet of Things (IoT)* <https://www.statista.com/study/27915/internet-of-things-iot-statista-dossier/> (2024).
7. BURHAN, M., REHMAN, R. A., KHAN, B. & KIM, B.-S., IoT elements, layered architectures and security issues : A comprehensive survey, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
8. SHARMA, N., SHAMKUWAR, M. & SINGH, I., in *Internet of Things and Big Data Analytics for Smart Generation* (éd. BALAS, V. E., SOLANKI, V. K., KUMAR, R. & KHARI, M.) 27-51 (Springer International Publishing, Cham, 2019), ISBN : 978-3-030-04203-5.
9. HASSAN, R., QAMAR, F., HASAN, M. K., AMAN, A. H. M. & AHMED, A. S., Internet of Things and Its Applications : A Comprehensive Survey, *Symmetry* **12**, ISSN : 2073-8994 (2020).
10. CHIANESE, A. & PICCIALI, F., *Designing a Smart Museum : When Cultural Heritage Joins IoT in 2014 Eighth International Conference on Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies* (2014), 300-306.
11. SANCHEZ, L. *et al.*, SmartSantander : IoT experimentation over a smart city testbed, *Computer Networks* **61**, Special issue on Future Internet Testbeds – Part I, 217-238, ISSN : 1389-1286 (2014).
12. ZANELLA, A., BUI, N., CASTELLANI, A., VANGELISTA, L. & ZORZI, M., Internet of Things for Smart Cities, *IEEE Internet of Things Journal* **1**, 22-32 (2014).

13. PETRIĆ, T., GOESSENS, M., NUAYMI, L., TOUTAIN, L. & PELOV, A., *Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN in 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (IEEE Press, Valencia, Spain, 2016), 1–7.
14. LATRE, S. *et al.*, *City of things : An integrated and multi-technology testbed for IoT smart city experiments in 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)* (2016), 1-8.
15. DATTA, P. & SHARMA, B., *A survey on IoT architectures, protocols, security and smart city based applications in 2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (2017), 1-5.
16. FRAGA-LAMAS, P., FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T. M. & CASTEDO, L., Towards the Internet of Smart Trains : A Review on Industrial IoT-Connected Railways, *Sensors* **17**, ISSN : 1424-8220 (2017).
17. HEJAZI, H., RAJAB, H., CINKLER, T. & LENGYEL, L., *Survey of platforms for massive IoT in 2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT)* (2018), 1-8.
18. PASOLINI, G. *et al.*, Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
19. OLADIMEJI, D. *et al.*, Smart Transportation : An Overview of Technologies and Applications, *Sensors* **23**, ISSN : 1424-8220 (2023).
20. XU, L. D., HE, W. & LI, S., Internet of Things in Industries : A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **10**, 2233-2243 (2014).
21. KUMAR S., A. A., OVSTHUS, K. & KRISTENSEN., L. M., An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks — A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **16**, 1391-1412 (2014).
22. De MOURA, R. L., de L. FARIAS CEOTTO, L. & GONZALEZ, A., *Industrial IoT and Advanced Analytics Framework : An Approach for the Mining Industry in 2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* (2017), 1308-1314.
23. QIN, J., LIU, Y. & GROSVENOR, R., A Framework of Energy Consumption Modelling for Additive Manufacturing Using Internet of Things, *Procedia CIRP* **63**, Manufacturing Systems 4.0 – Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 307-312, ISSN : 2212-8271 (2017).
24. WOLLSCHLAEGER, M., SAUTER, T. & JASPERNEITE, J., The Future of Industrial Communication : Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0, *IEEE Industrial Electronics Magazine* **11**, 17-27 (2017).

25. LI, T., XIA, M., CHEN, J., ZHAO, Y. & DE SILVA, C., Automated Water Quality Survey and Evaluation Using an IoT Platform with Mobile Sensor Nodes, *Sensors* **17**, ISSN : 1424-8220 (2017).
26. LI DA XU, E. L. X. & LI, L., Industry 4.0 : state of the art and future trends, *International Journal of Production Research* **56**, 2941-2962, eprint : <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806> (2018).
27. TAN, A., PENG, Y., SU, X., TONG, H. & DENG, Q., A Novel Synchronization Scheme Based on a Dynamic Superframe for an Industrial Internet of Things in Underground Mining, *Sensors* **19**, ISSN : 1424-8220 (2019).
28. HUI YANG Soundar Kumara, S. T. B. & TSUNG, F., The internet of things for smart manufacturing : A review, *IISE Transactions* **51**, 1190-1216, eprint : <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1555383> (2019).
29. SALHAOUI, M. *et al.*, Smart Industrial IoT Monitoring and Control System Based on UAV and Cloud Computing Applied to a Concrete Plant, *Sensors* **19**, ISSN : 1424-8220 (2019).
30. EDWARDS MURPHY, F., MAGNO, M., WHELAN, P. & VICI, E. P., *b+WSN : Smart beehive for agriculture, environmental, and honey bee health monitoring — Preliminary results and analysis* in *2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (2015), 1-6.
31. MEKALA, M. S. & VISWANATHAN, P., *A Survey : Smart agriculture IoT with cloud computing* in *2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)* (2017), 1-7.
32. BOZCHALUI, M. C., CAÑIZARES, C. A. & BHATTACHARYA, K., Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids, *IEEE Transactions on Smart Grid* **6**, 827-835 (2015).
33. RAJALAKSHMI, P & DEVI MAHALAKSHMI, S., *IOT based crop-field monitoring and irrigation automation* in *2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)* (2016), 1-6.
34. POPOVIĆ, T. *et al.*, Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring : A case study, *Computers and Electronics in Agriculture* **140**, 255-265, ISSN : 0168-1699 (2017).
35. ZHANG, X., ZHANG, J., LI, L., ZHANG, Y. & YANG, G., Monitoring Citrus Soil Moisture and Nutrients Using an IoT Based System, *Sensors* **17**, ISSN : 1424-8220 (2017).
36. DAGAR, R., SOM, S. & KHATRI, S. K., *Smart Farming – IoT in Agriculture* in *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (2018), 1052-1056.

37. ELASHIRI, M. A. & SHAWKY, A. T., *Fuzzy Smart Greenhouses Using IoT in 2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)* (2018), 1-4.
38. KHANNA, A. & KAUR, S., Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture* **157**, 218-231, ISSN : 0168-1699 (2019).
39. FAROOQ, M. S., RIAZ, S., ABID, A., ABID, K. & NAEEM, M. A., A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming, *IEEE Access* **7**, 156237-156271 (2019).
40. FRIHA, O., FERRAG, M. A., SHU, L., MAGLARAS, L. & WANG, X., Internet of Things for the Future of Smart Agriculture : A Comprehensive Survey of Emerging Technologies, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* **8**, 718-752 (2021).
41. KAYASTHA, N., NIYATO, D., HOSSAIN, E. & HAN, Z., Smart Grid Sensor Data Collection, Communication, and Networking : A Tutorial, *Wirel. Commun. Mob. Comput.* **14**, 1055–1087, ISSN : 1530-8669 (août 2014).
42. GUPTA, B. B. & AKHTAR, T., A survey on smart power grid : frameworks, tools, security issues, and solutions, *Annals of Telecommunications* **72**, 517-549, ISSN : 1958-9395 (oct. 2017).
43. JANSEN, L. L., ANDREADOU, N., PAPAIOANNOU, I. & MARINOPOULOS, A., Smart grid lab research in Europe and beyond, *International Journal of Energy Research* **44**, 1307-1336, eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.4818> (2020).
44. ALOMAR, M. A., An IOT based smart grid system for advanced cooperative transmission and communication, *Physical Communication* **58**, 102069, ISSN : 1874-4907 (2023).
45. LEE, H.-C., LIU, H.-Y., LIN, T.-C. & LEE, C.-Y., A Customized Energy Management System for Distributed PV, Energy Storage Units, and Charging Stations on Kinmen Island of Taiwan, *Sensors* **23**, ISSN : 1424-8220 (2023).
46. KATARAY, T. *et al.*, Integration of smart grid with renewable energy sources : Opportunities and challenges – A comprehensive review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **58**, 103363, ISSN : 2213-1388 (2023).
47. SALEEM, M. U. *et al.*, Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids, *Energies* **16**, ISSN : 1996-1073 (2023).

48. JUANG, P. *et al.*, *Energy-efficient computing for wildlife tracking : design tradeoffs and early experiences with ZebraNet* in *Proceedings of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems* (Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2002), 96–107, ISBN : 1581135742.
49. FERRÚS, R. & SALLEN, O., in *Mobile Broadband Communications for Public Safety : The Road Ahead Through LTE Technology* 1-48 (2015).
50. NIMBARGI, S. R., HADAWALE, S. & GHODKE, G., *Tsunami alert & detection system using IoT : A survey* in *2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIGDATA)* (2017), 182-184.
51. JEONG, M. *et al.*, *Development and Application of the Smart Helmet for Disaster and Safety* in *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (2018), 1084-1089.
52. WELLINGTON, J. J. & RAMESH, P., *Role of Internet of Things in disaster management in 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS)* (2017), 1-4.
53. JAYARAM, K., JANANI, K., JEYAGURU, R., KUMARESH, R. & MURALIDHARAN, N., *Forest Fire Alerting System With GPS Co-ordinates Using IoT* in *2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)* (2019), 488-491.
54. YOON, Z., FRESE, W. & BRIESS, K., *Design and Implementation of a Narrow-Band Inter-satellite Network with Limited Onboard Resources for IoT*, *Sensors* **19**, ISSN : 1424-8220 (2019).
55. KIM, M.-C. & KIM, Y.-T., *Smart Control for Energy Efficient Networking of IEEE 802.11ah-based IoT* in *2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)* (2019), 1-6.
56. CHACZKO, Z., KALE, A., SANTANA-RODRÍGUEZ, J. J. & SUÁREZ-ARAÚJO, C. P., *Towards an IOT Based System for Detection and Monitoring of Microplastics in Aquatic Environments* in *2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)* (2018), 000057-000062.
57. AL-FUQAHA, A., GUIZANI, M., MOHAMMADI, M., ALEDHARI, M. & AYYASH, M., *Internet of Things : A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **17**, 2347-2376 (2015).
58. LAFLEUR, J. P., JÖNSSON, A., SENKBELL, S. & KUTTER, J. P., *Recent advances in lab-on-a-chip for biosensing applications*, *Biosensors and Bioelectronics* **76**, 30th Anniversary Issue, 213-233, ISSN : 0956-5663 (2016).

59. KASSEM, A., HAMAD, M., EL MOUCARY, C., NAWFAL, E. & AOUN, A., *MedBed : Smart medical bed* in *2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)* (2017), 1-4.
60. SANTOS, J. *et al.*, An IoT-based mobile gateway for intelligent personal assistants on mobile health environments, *Journal of Network and Computer Applications* **71**, 194-204, ISSN : 1084-8045 (2016).
61. SOOD, S. K. & MAHAJAN, I., Wearable IoT sensor based healthcare system for identifying and controlling chikungunya virus, *Computers in Industry* **91**, 33-44, ISSN : 0166-3615 (2017).
62. ALAM, M. M. *et al.*, A Survey on the Roles of Communication Technologies in IoT-Based Personalized Healthcare Applications, *IEEE Access* **6**, 36611-36631 (2018).
63. ISHAK, M. K. & KIT, N. M., *Design and Implementation of Robot Assisted Surgery Based on Internet of Things (IoT)* in *2017 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)* (2017), 65-70.
64. YUE, H. *et al.*, A New Approach for Noncontact Imaging Photoplethysmography Using Chrominance Features and Low-Rank in the IoT Operating Room, *IEEE Access* **7**, 112284-112294 (2019).
65. BALAJI, S., NATHANI, K. & SANTHAKUMAR, R., IoT Technology, Applications and Challenges : A Contemporary Survey, *Wireless Personal Communications* **108**, 363-388, ISSN : 1572-834X (sept. 2019).
66. SWAROOP, K. N., CHANDU, K., GORREPOTU, R. & DEB, S., A health monitoring system for vital signs using IoT, *Internet of Things* **5**, 116-129, ISSN : 2542-6605 (2019).
67. PATADE, A. S., GANDHI, H. P. & SHARMA, N., *IOT Solutions for Hospitals* in *2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)* (2019), 813-816.
68. AL-FUQAHA, A., GUIZANI, M., MOHAMMADI, M., ALEDHARI, M. & AYYASH, M., Internet of Things : A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **17**, 2347-2376 (2015).
69. ČOLAKOVIĆ, A. & HADŽIALIĆ, M., Internet of Things (IoT) : A review of enabling technologies, challenges, and open research issues, *Computer Networks* **144**, 17-39, ISSN : 1389-1286 (2018).
70. DING, J., NEMATI, M., RANAWEERA, C. & CHOI, J., IoT Connectivity Technologies and Applications : A Survey, *IEEE Access* **8**, 67646-67673 (2020).

71. KASSAB, W. & DARABKH, K. A., A-Z survey of Internet of Things : Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations, *Journal of Network and Computer Applications* **163**, 102663, ISSN : 1084-8045 (2020).
72. BABUN, L., DENNEY, K., CELIK, Z. B., MCDANIEL, P. & ULUAGAC, A. S., A survey on IoT platforms : Communication, security, and privacy perspectives, *Computer Networks* **192**, 108040, ISSN : 1389-1286 (2021).
73. (IETF), I. E. T. F., *Terminology for Constrained-Node Networks* <https://www.ietf.org/rfc/rfc7228.txt> (2023).
74. POP, D., KIRDAN, E. & PAHL, M.-O., *Performance Comparison of UDP and TCP for Different CoAP Load Profiles in NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium* (2023), 1-6.
75. MISHRA, B. & KERTESZ, A., The Use of MQTT in M2M and IoT Systems : A Survey, *IEEE Access* **8**, 201071-201086 (2020).
76. ALLIANCE, O. M., *LwM2M* <https://lwm2m.openmobilealliance.org/> (2023).
77. OPEN, O., *MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) - Protocol Specification - Version 1.2* https://www.oasis-open.org/committees/download.php/66091/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf (2023).
78. OLIVEIRA, L., RODRIGUES, J. J. P. C., KOZLOV, S. A., RABÊLO, R. A. L. & ALBUQUERQUE, V. H. C. d., MAC Layer Protocols for Internet of Things : A Survey, *Future Internet* **11**, ISSN : 1999-5903 (2019).
79. COSTA, F. *et al.*, A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things, *Sensors* **21**, ISSN : 1424-8220 (2021).
80. COSKUN, V., OZDENIZCI, B. & OK, K., A Survey on Near Field Communication (NFC) Technology, *Wireless Personal Communications* **71**, 2259-2294, ISSN : 1572-834X (août 2013).
81. GOMEZ, C., OLLER, J. & PARADELLS, J., Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy : An Emerging Low-Power Wireless Technology, *Sensors* **12**, 11734-11753, ISSN : 1424-8220 (2012).
82. YANG, J., POELLABAUER, C., MITRA, P. & NEUBECKER, C., Beyond beaconing : Emerging applications and challenges of BLE, *Ad Hoc Networks* **97**, 102015, ISSN : 1570-8705 (2020).
83. JEON, K. E., SHE, J., SOONSAWAD, P. & NG, P. C., BLE Beacons for Internet of Things Applications : Survey, Challenges, and Opportunities, *IEEE Internet of Things Journal* **5**, 811-828 (2018).

84. HAQUE, K. F., ABDELGAWAD, A. & YELAMARTHI, K., Comprehensive Performance Analysis of Zigbee Communication : An Experimental Approach with XBee S2C Module, *Sensors* **22**, ISSN : 1424-8220 (2022).
85. DÍEZ, V., ARRIOLA, A., VAL, I. & VELEZ, M., Reliability evaluation of point-to-point links based on IEEE 802.15.4 physical layer for IWSAN applications, *AEU - International Journal of Electronics and Communications* **113**, 152967, ISSN : 1434-8411 (2020).
86. AHMED, N., DE, D., BARBHUIYA, F. A. & HUSSAIN, M. I., MAC Protocols for IEEE 802.11ah-Based Internet of Things : A Survey, *IEEE Internet of Things Journal* **9**, 916-938 (2022).
87. TIAN, L., SANTI, S., SEFERAGIĆ, A., LAN, J. & FAMAHEY, J., Wi-Fi HaLow for the Internet of Things : An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research, *Journal of Network and Computer Applications* **182**, 103036, ISSN : 1084-8045 (2021).
88. KANJ, M., SAVAUX, V. & LE GUEN, M., A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **22**, 2408-2446 (2020).
89. MWAKWATA, C. B. *et al.*, Narrowband Internet of Things (NB-IoT) : From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives, *Sensors* **19**, ISSN : 1424-8220 (2019).
90. LEVCHENKO, P., BANKOV, D., KHOROV, E. & LYAKHOV, A., Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN, *Sensors* **22**, ISSN : 1424-8220 (2022).
91. ERTÜRK, M. A., AYDIN, M. A., BÜYÜKAKKAŞLAR, M. T. & EVIRGEN, H., A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies, *Future Internet* **11**, ISSN : 1999-5903 (2019).
92. CHAUDHARI, B. & ZENNARO, M., *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications* 431, ISBN : 978-0-12-818880-4 (Academic Press, 2020).
93. CHIANI, M. & ELZANATY, A., On the LoRa Modulation for IoT : Waveform Properties and Spectral Analysis, *IEEE Internet of Things Journal* **6**, 8463-8470 (2019).
94. HAXHIBEQIRI, J., DE POORTER, E., MOERMAN, I. & HOEBEKE, J., A Survey of LoRaWAN for IoT : From Technology to Application, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
95. KUFAKUNESU, R., HANCKE, G. P. & ABU-MAHFOUZ, A. M., A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN : Recent Solutions and Major Challenges, *Sensors* **20**, ISSN : 1424-8220 (2020).
96. RAY, P. P., A survey of IoT cloud platforms, *Future Computing and Informatics Journal* **1**, 35-46, ISSN : 2314-7288 (2016).
97. TANEJA, M., *802.11ah - LPWA interworking in 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft)* (2016), 441-446.

98. RAZA, U., KULKARNI, P. & SOORIYABANDARA, M., Low Power Wide Area Networks : An Overview, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **19**, 855-873 (2017).
99. PERAHIA, E. & STACEY, R., *Next Generation Wireless LANs : 802.11n and 802.11ac* 2^e éd. (Cambridge University Press, 2013).
100. SANKARAN, S. & GULASEKARAN, S., *Wi-Fi 6 : Protocol and Network* ISBN : 9781630818432 (Artech House, 2021).
101. BAÑOS-GONZALEZ, V., AFAQUI, M. S., LOPEZ-AGUILERA, E. & GARCIA-VILLEGAS, E., IEEE 802.11ah : A Technology to Face the IoT Challenge, *Sensors* **16**, ISSN : 1424-8220 (2016).
102. MEERA, M. & RAO, S. N., *A Survey of the State of the Art of 802.11ah in 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)* (2017), 1-4.
103. QIAO, L., ZHENG, Z., CUI, W. & WANG, L., *A Survey on Wi-Fi HaLow Technology for Internet of Things in 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (2018), 1-5.
104. PARK, M., IEEE 802.11ah : sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things, *IEEE Communications Magazine* **53**, 145-151 (2015).
105. SHAFIQ, M. *et al.*, Multiple Access Control for Cognitive Radio-Based IEEE 802.11ah Networks, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
106. LEE, I.-G. *et al.*, WiFi HaLow for Long-Range and Low-Power Internet of Things : System on Chip Development and Performance Evaluation, *IEEE Communications Magazine* **59**, 101-107 (2021).
107. 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 Std 802.11ah-2016 (Amendment to IEEE Std 802.11-2016, as amended by IEEE Std 802.11ai-2016)*, 1-594 (2017).
108. YONIS, A., DWEIG, H. & TAREED, A., *Comprehensive analysis of IEEE 802.11ah for Wireless Communication Networks in 2021 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)* (2021), 28-31.
109. DE KONINCK, T., SANTI, S., FAMAHEY, J. & LEMIC, F., *Experimental Validation of IEEE 802.11ah Propagation Models in Heterogeneous Smart City Environments in GLOBE-COM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference* (2020), 1-6.
110. HAZMI, A., RINNE, J. & VALKAMA, M., *Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases in 2012 IEEE Globecom Workshops* (2012), 1687-1692.

111. AUST, S. & ITO, T., *Sub 1GHz wireless LAN propagation path loss models for urban smart grid applications* in *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)* (2012), 116-120.
112. BELLEKENS, B., TIAN, L., BOER, P., WEYN, M. & FAMAËY, J., *Outdoor IEEE 802.11ah Range Characterization Using Validated Propagation Models* in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference* (2017), 1-6.
113. TSCHIMBEN, S., GIFFORD, K. & BROWN, R., *IEEE 802.11ah SDR Implementation and Range Evaluation* in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2019), 1-6.
114. KHOROV, E., LYAKHOV, A., KROTOV, A. & GUSCHIN, A., A survey on IEEE 802.11ah : An enabling networking technology for smart cities, *Computer Communications* **58**, Special Issue on Networking and Communications for Smart Cities, 53-69, ISSN : 0140-3664 (2015).
115. FARHAD, A. & PYUN, J.-Y., Resource Management for Massive Internet of Things in IEEE 802.11ah WLAN : Potentials, Current Solutions, and Open Challenges, *Sensors* **22**, ISSN : 1424-8220 (2022).
116. RAJANDEKAR, A. & SIKDAR, B., A Survey of MAC Layer Issues and Protocols for Machine-to-Machine Communications, *IEEE Internet of Things Journal* **2**, 175-186 (2015).
117. CHENG, Y., YANG, D., ZHOU, H. & WANG, H., Adopting IEEE 802.11 MAC for industrial delay-sensitive wireless control and monitoring applications : A survey, *Computer Networks* **157**, 41-67, ISSN : 1389-1286 (2019).
118. BEL, A. *et al.*, *CAS-based Channel Access Protocol for IEEE 802.11ah WLANs* in *European Wireless 2014 ; 20th European Wireless Conference* (2014), 1-6.
119. KUREEV, A., BANKOV, D., KHOROV, E. & LYAKHOV, A., *Improving efficiency of heterogeneous Wi-Fi networks with joint usage of TIM segmentation and restricted access window* in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2017), 1-5.
120. GUÉRIN, E., BEGIN, T. & GUÉRIN LASSOUS, I., An overview of MAC energy-saving mechanisms in Wi-Fi, *Computer Communications* **203**, 129-145, ISSN : 0140-3664 (2023).
121. TSAO, S.-L. & HUANG, C.-H., A survey of energy efficient MAC protocols for IEEE 802.11 WLAN, *Computer Communications* **34**, 54-67, ISSN : 0140-3664 (2011).
122. ADAME, T. *et al.*, *Capacity Analysis of IEEE 802.11ah WLANs for M2M Communications* in *Proceedings of the 6th International Workshop on Multiple Access Communications - Volume 8310* (Springer-Verlag, Vilnius, Lithuania, 2013), 139–155, ISBN : 9783319038704.

-
123. ADAME, T., BEL, A., BELLALTA, B., BARCELO, J. & OLIVER, M., IEEE 802.11AH : the WiFi approach for M2M communications, *IEEE Wireless Communications* **21**, 144-152 (2014).
 124. PARK, M., *IEEE 802.11ah : Energy efficient MAC protocols for long range wireless LAN* in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2014), 2388-2393.
 125. KHOROV, E., KROTOV, A. & LYAKHOV, A., *Modelling machine type communication in IEEE 802.11ah networks* in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)* (2015), 1149-1154.
 126. SUN, W., CHOI, M. & CHOI, S., IEEE 802.11ah : A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz, *Journal of ICT Standardization* **1**, 83-108 (juill. 2013).
 127. DOMAZETOVIĆ, B., KOČAN, E. & MIHOVSKA, A., *Performance evaluation of IEEE 802.11ah systems* in *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)* (2016), 1-4.
 128. KHAN, S. & ZEESHAN, M., *Performance and Throughput Analysis of IEEE 802.11ah for Multiband Multimode Operation* in *2018 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)* (2018), 150-155.
 129. TIAN, L. *et al.*, Multi-objective surrogate modeling for real-time energy-efficient station grouping in IEEE 802.11ah, *Pervasive and Mobile Computing* **57**, 33-48, ISSN : 1574-1192 (2019).
 130. ŠLJIVO, A. *et al.*, Performance Evaluation of IEEE 802.11ah Networks With High-Throughput Bidirectional Traffic, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
 131. KHOROV, E., LYAKHOV, A. & YUSUPOV, R., *Two-Slot Based Model of the IEEE 802.11ah Restricted Access Window with Enabled Transmissions Crossing Slot Boundaries* in *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)* (2018), 1-9.
 132. ZHENG, Z., CUI, W., QIAO, L. & GUO, J., Performance and Power Consumption Analysis of IEEE802.11ah for Smart Grid, *Wireless Communications and Mobile Computing* **2018**, 5286560, ISSN : 1530-8669 (juill. 2018).
 133. Qutab-ud DIN, M. *et al.*, *Duty Cycle Challenges of IEEE 802.11ah Networks in M2M and IoT Applications* in *European Wireless 2016 ; 22th European Wireless Conference* (2016), 1-7.
 134. BANKOV, D., KHOROV, E., LYAKHOV, A. & STEPANOVA, E., *Clock Drift Impact on Target Wake Time in IEEE 802.11ax/ah Networks* in *2018 Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT)* (2018), 30-34.

135. KAO, T.-L., WANG, H.-C., LU, C.-H. & CHENG, T.-H., An Energy Consumption Evaluation of Non-TIM Strategy in IEEE 802.11ah, *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* **644**, 012008 (oct. 2019).
136. SOARES, S. M. & CARVALHO, M. M., An Analytical Model for the Aggregate Throughput of IEEE 802.11ah Networks under the Restricted Access Window Mechanism, *Sensors* **22**, ISSN : 1424-8220 (2022).
137. MINH DANG, D. N. *et al.*, *Space-Frequency Diversity based MAC protocol for IEEE 802.11 ah networks* in *2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)* (2022), 159-164.
138. TARAMIT, H., OROZCO-BARBOSA, L., HAQIQ, A., ESCOTO, J. J. C. & GOMEZ, J., Load-Aware Channel Allocation for IEEE 802.11ah-Based Networks, *IEEE Access* **11**, 24484-24496 (2023).
139. MONDAL, M. A., KHONGJOH, S. & HUSSAIN, M. I., *RAW Optimization of IEEE 802.11ah Networks* in *2023 4th International Conference on Computing and Communication Systems (I3CS)* (2023), 1-5.
140. MONDAL, M. A., AHMED, N. & HUSSAIN, M. I., IoT-MAC : A Channel Access Mechanism for IoT Smart Environment, *Array* **18**, 100285, ISSN : 2590-0056 (2023).
141. TARAMIT, H., OROZCO-BARBOSA, L. & HAQIQ, A., *Resource and Energy-Efficient Configuration of IEEE 802.11ah Networks under Rayleigh Channels* in *2022 4th IEEE Middle East and North Africa COMMUNICATIONS Conference (MENACOMM)* (2022), 177-184.
142. MONDAL, M. A. & HUSSAIN, M. I., Station Grouping Mechanism using Machine Learning Approach for IEEE 802.11ah, *Ad Hoc Networks* **149**, 103238, ISSN : 1570-8705 (2023).
143. WANG, G.-S., LIN, C.-Y., TSENG, Y.-C. & VAN, L.-D., *A Multilayer Perceptron Model for Station Grouping in IEEE 802.11ah Networks* in *NOMS 2023-2023 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium* (2023), 1-5.
144. GARCIA-VILLEGAS, E., LOPEZ-GARCIA, A. & LOPEZ-AGUILERA, E., Genetic Algorithm-Based Grouping Strategy for IEEE 802.11ah Networks, *Sensors* **23**, ISSN : 14248220 (2 jan. 2023).
145. AHMED, N. & HUSSAIN, M. I., A QoS-Aware Scheduling with Node Grouping for IEEE 802.11ah, *Wirel. Netw.* **29**, 1799–1814, ISSN : 1022-0038 (jan. 2023).
146. MAHESH, M. & HARIGOVINDAN, V., Hidden terminal aware grouping scheme for IEEE 802.11ah based dense IoT networks, *Computer Communications* **191**, 161-172, ISSN : 0140-3664 (2022).
147. DEVICEWORX, *DeviceWorx* <https://www.deviceworx.com/> (2023).

-
148. NEWRACOM, I., *NRC7292 Standalone SDK Package* <https://github.com/newracom> (2023).
 149. ASSOCIATION, I. S., *CR-PV1-Security* IEEE Standards Association, https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=PV1 (2024).
 150. Van WYK, J. & LINDE, L., *Bit error probability for a M-ary QAM OFDM-based system* in *AFRICON 2007* (2007), 1-5.
 151. ALFA_NETWORK, *AHPI7292S* <https://www.alfa.com.tw/products/ahpi7292s> (2023).
 152. NEWRACOM, *NRC7292* <https://newracom.com/products/nrc7292> (2023).
 153. SEFERAGIĆ, A., FAMAHEY, J., DE POORTER, E. & HOEBEKE, J., Survey on Wireless Technology Trade-Offs for the Industrial Internet of Things, *Sensors* **20**, ISSN : 1424-8220 (2020).
 154. ALAM, M., AHMED, N., MATAM, R. & BARBHUIYA, F. A., IEEE 802.11ah-Enabled Internet of Drone Architecture, *IEEE Internet of Things Magazine* **5**, 174-178 (2022).
 155. ZHAO, Y., YILMAZ, O. N. C. & LARMO, A., *Optimizing M2M Energy Efficiency in IEEE 802.11ah* in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (2015), 1-6.
 156. KAI, C., ZHANG, J., ZHANG, X. & HUANG, W., Energy-Efficient Sensor Grouping for IEEE 802.11ah Networks With Max-Min Fairness Guarantees, *IEEE Access* **7**, 102284-102294 (2019).
 157. KIM, T., QIAO, D. & CHOI, W., *Energy-Efficient Scheduling of Internet of Things Devices for Environment Monitoring Applications* in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2018), 1-7.
 158. SANGEETHA, U. & BABU, A., Fair and efficient resource allocation in IEEE 802.11ah WLAN with heterogeneous data rates, *Computer Communications* **151**, 154-164, ISSN : 0140-3664 (2020).
 159. AHMED, N. & HUSSAIN, M. I., Periodic Traffic Scheduling for IEEE 802.11ah Networks, *IEEE Communications Letters* **24**, 1510-1513 (2020).
 160. BEL, A., ADAME, T. & BELLALTA, B., An energy consumption model for IEEE 802.11ah WLANs, *Ad Hoc Networks* **72**, 14-26, ISSN : 1570-8705 (2018).
 161. AGARWAL, V., DECARLO, R. A. & TSOUKALAS, L. H., Modeling Energy Consumption and Lifetime of a Wireless Sensor Node Operating on a Contention-Based MAC Protocol, *IEEE Sensors Journal* **17**, 5153-5168 (2017).

162. BELTRAMELLI, L., ÖSTERBERG, P., JENNEHAG, U. & GIDLUND, M., *Hybrid MAC mechanism for energy efficient communication in IEEE 802.11ah* in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (2017), 1295-1300.
163. NGO, Q. T., DANG, D. N. & LE-TRUNG, Q., Extreme power saving directional MAC protocol in IEEE 802.11ah networks, *IET Networks* **9**, 180-188, eprint : <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-net.2019.0176> (2020).
164. ZHENG, L., CAI, L., PAN, J. & NI, M., *Performance analysis of grouping strategy for dense IEEE 802.11 networks* in *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (2013), 219-224.
165. WANG, Y., LI, Y., CHAI, K. K., CHEN, Y. & SCHORMANS, J., *Energy-aware adaptive restricted access window for IEEE 802.11ah based networks* in *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2015), 1211-1215.
166. WANG, Y., LI, Y., CHAI, K. K., CHEN, Y. & SCHORMANS, J., *Energy-aware adaptive restricted access window for IEEE 802.11ah based smart grid networks* in *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* (2015), 581-586.
167. WANG, Y., CHAI, K. K., CHEN, Y., SCHORMANS, J. & LOO, J., *Energy-aware Restricted Access Window control with retransmission scheme for IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) based networks* in *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)* (2017), 69-76.
168. BANKOV, D., KHOROV, E., LYAKHOV, A. & FAMAHEY, J., Resource Allocation for Machine-Type Communication of Energy-Harvesting Devices in Wi-Fi HaLow Networks, *Sensors* **20**, ISSN : 1424-8220 (2020).
169. ZHANG, X. & YEUNG, K. L., *LLE : A timer extension mechanism for alarm-triggered traffic in IEEE 802.11ah WLANs* in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2017), 1-6.
170. GOPINATH, A. J. & NITHYA, B., Mathematical and simulation analysis of contention resolution mechanism for IEEE 802.11ah networks, *Computer Communications* **124**, 87-100, ISSN : 0140-3664 (2018).
171. SILEX_TECHNOLOGY, *SX-NEWAH Evaluation Kit* <https://www.silextechnology.com/connectivity-solutions/embedded-wireless/sx-newah-evaluation> (2023).
172. THINGSBOARD, *ThingsBoard Open-source IoT Platform* <https://thingsboard.io/> (2023).

-
173. HASAN, K., TOM, N. & YUCE, M. R., Navigating Battery Choices in IoT : An Extensive Survey of Technologies and Their Applications, *Batteries* **9**, ISSN : 2313-0105 (2023).
 174. ZHOU, W., ZHENG, Y., PAN, Z. & LU, Q., Review on the Battery Model and SOC Estimation Method, *Processes* **9**, ISSN : 2227-9717 (2021).
 175. ZHOU, Y. & NETTLES, S., *Balancing the hidden and exposed node problems with power control in CSMA/CA-based wireless networks* in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005* **2** (2005), 683-688 Vol. 2.
 176. EKICI, O. & YONGACOGLU, A., IEEE 802.11a Throughput Performance with Hidden Nodes, *IEEE Communications Letters* **12**, 465-467 (2008).
 177. YOON, S.-G., SEO, J.-O. & BAHK, S., Regrouping algorithm to alleviate the hidden node problem in 802.11ah networks, *Computer Networks* **105**, 22-32, ISSN : 1389-1286 (2016).
 178. KUMAR, S., CHOI, S. & KIM, H., Analysis of hidden terminal's effect on the performance of vehicular ad-hoc networks, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2019**, 240, ISSN : 1687-1499 (oct. 2019).
 179. AIT AOUDIA, F., GAUTIER, M., MAGNO, M., BERDER, O. & BENINI, L., A Generic Framework for Modeling MAC Protocols in Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking* **25**, 1489-1500 (2017).
 180. TSAREV, A., KHAYROV, E., MEDVEDEVA, E., GAIDAMAKA, Y. & BURATTI, C., *Analytical Model for CSMA-Based MAC Protocol for Industrial IoT Applications* in *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems* (éd. GALININA, O., ANDREEV, S., BALANDIN, S. & KOUCHERYAVY, Y.) (Springer International Publishing, Cham, 2020), 240-258, ISBN : 978-3-030-65729-1.
 181. SAMOUYLOV, K. E., GAIDAMAKA, Y. V., GUDKOVA, I. A., ZARIPOVA, E. R. & SHORGIN, S. Y., *Baseline Analytical Model for Machine-Type Communications Over 3GPP RACH in LTE-Advanced Networks* in *Computer and Information Sciences* (éd. CZACHÓRSKI, T., GELENBE, E., GROCHLA, K. & LENT, R.) (Springer International Publishing, Cham, 2016), 203-213, ISBN : 978-3-319-47217-1.
 182. THE MATHWORKS, I., *MathWorks - WLAN ToolBox* <https://fr.mathworks.com/products/wlan.html> (2024).
 183. AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T. & TOWNSLEY, W. M., A Study of LoRa : Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things, *Sensors* **16**, ISSN : 1424-8220 (2016).
 184. ADELANTADO, F. *et al.*, Understanding the Limits of LoRaWAN, *IEEE Communications Magazine* **55**, 34-40 (2017).

185. REYNDERS, B., MEERT, W. & POLLIN, S., *Power and spreading factor control in low power wide area networks* in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2017), 1-6.
186. JOVALEKIC, N., DRNDAREVIC, V., PIETROSEMOLI, E., DARBY, I. & ZENNARO, M., Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
187. BOR, M. & ROEDIG, U., *LoRa Transmission Parameter Selection* in *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)* (2017), 27-34.
188. NOREEN, U., BOUNCEUR, A. & CLAVIER, L., *A study of LoRa low power and wide area network technology* in *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)* (2017), 1-6.
189. SANCHEZ-IBORRA, R., SANCHEZ-GOMEZ, J., BALLESTA-VIÑAS, J., CANO, M.-D. & SKARMETA, A. F., Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
190. MIKHAYLOV, K., PETAJAJARVI, J. & HANNINEN, T., *Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology* in *European Wireless 2016 ; 22th European Wireless Conference* (2016), 1-6.
191. AMELOOT, T., VAN TORRE, P. & ROGIER, H., A Compact Low-Power LoRa IoT Sensor Node with Extended Dynamic Range for Channel Measurements, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
192. SINHA, R. S., WEI, Y. & HWANG, S.-H., A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT, *ICT Express* **3**, 14-21, ISSN : 2405-9595 (2017).
193. MUTEBA, F., DJOUANI, K. & OLWAL, T., A comparative Survey Study on LPWA IoT Technologies : Design, considerations, challenges and solutions, *Procedia Computer Science* **155**, The 16th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2019),The 14th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2019),The 9th International Conference on Sustainable Energy Information Technology, 636-641, ISSN : 1877-0509 (2019).
194. MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F. & MEYER, F., A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express* **5**, 1-7, ISSN : 2405-9595 (2019).
195. BOUGUERA, T., DIOURIS, J.-F., CHAILLOUT, J.-J., JAOUADI, R. & ANDRIEUX, G., Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN, *Sensors* **18**, ISSN : 1424-8220 (2018).
196. DELGADO, C., SANZ, J. M., BLONDIA, C. & FAMAHEY, J., Batteryless LoRaWAN Communications Using Energy Harvesting : Modeling and Characterization, *IEEE Internet of Things Journal* **8**, 2694-2711 (2021).

-
197. MORIN, E., MAMAN, M., GUIZZETTI, R. & DUDA, A., Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things, *IEEE Access* **5**, 7097-7114 (2017).
 198. CASALS, L., MIR, B., VIDAL, R. & GOMEZ, C., Modeling the Energy Performance of LoRaWAN, *Sensors* **17**, ISSN : 1424-8220 (2017).
 199. BOR, M., VIDLER, J. & ROEDIG, U., *LoRa for the Internet of Things* in *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks* (Junction Publishing, Graz, Austria, 2016), 361–366, ISBN : 9780994988607.
 200. SLABICKI, M., PREMSANKAR, G. & DI FRANCESCO, M., *Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments* in *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium* (2018), 1-9.
 201. CALLEBAUT, G., OTTOY, G. & van der PERRE, L., *Cross-Layer Framework and Optimization for Efficient Use of the Energy Budget of IoT Nodes* in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2019), 1-6.
 202. KRAIJAK, S. & TUWANUT, P., *A survey on IoT architectures, protocols, applications, security, privacy, real-world implementation and future trends* in *11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015)* (2015), 1-6.
 203. JANGID, A. & CHAUHAN, P., *A Survey and Challenges in IoT Networks* in *2019 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)* (2019), 516-521.
 204. VANGELISTA, L., Frequency Shift Chirp Modulation : The LoRa Modulation, *IEEE Signal Processing Letters* **24**, 1818-1821 (2017).
 205. SPRINGER, A. *et al.*, Spread spectrum communications using chirp signals, 166-170 (2000).
 206. LORA__ALLIANCE, *LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.2* https://LoRa-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/RP_2-1.0.2.pdf (2024).
 207. RAHMADHANI, A. & KUIPERS, F., *When LoRaWAN Frames Collide* in *Proceedings of the 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization* (Association for Computing Machinery, New Delhi, India, 2018), 89–97, ISBN : 9781450359306.
 208. LORA__ALLIANCE, *LoRaWAN Link Layer Specification v1.0.4* https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/ (2024).
 209. BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T. & ALONSO, J. M., *Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale ?* in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems* (Association for Computing Machinery, Malta, Malta, 2016), 59–67, ISBN : 9781450345026.

210. CALLEBAUT, G. & Van der PERRE, L., Characterization of LoRa Point-to-Point Path Loss : Measurement Campaigns and Modeling Considering Censored Data, *IEEE Internet of Things Journal* **7**, 1910-1918 (2020).
211. XU, W. *et al.*, Measurement, Characterization, and Modeling of LoRa Technology in Multifloor Buildings, *IEEE Internet of Things Journal* **7**, 298-310 (2020).
212. EL CHALL, R., LAHOUD, S. & EL HELOU, M., LoRaWAN Network : Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon, *IEEE Internet of Things Journal* **6**, 2366-2378 (2019).
213. JÖRKE, P., BÖCKER, S., LIEDMANN, F. & WIETFELD, C., *Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz in 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2017), 1-6.
214. SEMTECH, *SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver* <https://www.semtech.fr/products/wireless-rf/lora-connect/sx1272> (2024).
215. STMICROELECTRONICS, *STM32 Nucleo-64 development board with STM32L073RZ MCU NUCLEO-L073RZ*, <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l073rz.html> (2024).
216. STMICROELECTRONICS, *STM32L073RZ Ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU* <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l073rz.html> (2024).
217. BANKOV, D., KHOROV, E. & LYAKHOV, A., *On the Limits of LoRaWAN Channel Access in 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)* (2016), 10-14.
218. REYNDERS, B., MEERT, W. & POLLIN, S., *Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication in 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)* (2016), 1-6.
219. MULTI-TECH SYSTEMS, I., *Long Range LoRaWAN Modules MultiTech mDotMultiTech mDot* Multi-Tech Systems, <https://multitech.com/all-products/lorawan-devices/lorawan-modules/multitech-mdot/> (2024).
220. SAAVEDRA, E., MASCARAQUE, L., CALDERON, G., del CAMPO, G. & SANTAMARIA, A., The Smart Meter Challenge : Feasibility of Autonomous Indoor IoT Devices Depending on Its Energy Harvesting Source and IoT Wireless Technology, *Sensors* **21**, ISSN : 1424-8220 (2021).
221. SKORIN-KAPOV, L. & MATIJASEVIC, M., Analysis of QoS Requirements for e-Health Services and Mapping to Evolved Packet System QoS Classes, *International Journal of Telemedicine and Applications* **2010**, 628086, ISSN : 1687-6415 (oct. 2010).

-
222. ARNON, S., BHASTEKAR, D., KEDAR, D. & TAUBER, A., A comparative study of wireless communication network configurations for medical applications, *IEEE Wireless Communications* **10**, 56-61 (2003).
223. KHAN, R. H. & KHAN, J. Y., A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network, *Computer Networks* **57**, 825-845, ISSN : 1389-1286 (2013).
224. KUZLU, M., PIPATTANASOMPORN, M. & RAHMAN, S., Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN, *Computer Networks* **67**, 74-88, ISSN : 1389-1286 (2014).
225. KANE, L., LIU, V., MCKAGUE, M. & WALKER, G., An Experimental Field Comparison of Wi-Fi HaLow and LoRa for the Smart Grid, *Sensors* **23**, ISSN : 1424-8220 (2023).
226. TRIANTAFYLLOU, A., SARIGIANNIDIS, P. & BIBI, S., Precision Agriculture : A Remote Sensing Monitoring System Architecture, *Information* **10**, ISSN : 2078-2489 (2019).
227. IBRAHIM, A. S., YOUSSEF, K. Y., KAMEL, H. & ABOUELATTA, M., Traffic modelling of smart city internet of things architecture, *IET Communications* **14**, 1275-1284, eprint : <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-com.2019.1252> (2020).
228. BAI, L., YAO, L., KANHERE, S. S., WANG, X. & YANG, Z., *Automatic Device Classification from Network Traffic Streams of Internet of Things* in *2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN)* (2018), 1-9.
229. MOCNEJ, J., PEKAR, A., SEAH, W. K. & ZOLOTOVA, I., *Network traffic characteristics of the IoT application use cases* in (School of Engineering et Computer Science, Victoria University of Wellington, 2018).

Titre : Analyse et modélisation énergétiques des réseaux de communications pour l'IoT

Mot clés : Réseaux de capteurs sans fil, IoT, Consommation énergétique, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN

Résumé : L'IoT est un concept innovant qui permet à des objets d'échanger des informations à travers des réseaux de communications. Ces objets sont généralement déployés avec des ressources énergétiques limitées et les protocoles de communications pour l'IoT doivent tenir compte de ces contraintes. Dans cette thèse, nous avons analysé et modélisé la consommation énergétique de deux des protocoles de communication les plus en vue de l'IoT. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au Wi-Fi HaLow. Après une présentation descriptive de ce protocole et de ses mécanismes, ses performances ont été étudiées et qualifiées. Des campagnes de mesures ont montré son bon comportement en termes de portée, de débit et de latence. L'analyse du protocole ainsi que des mesures de l'énergie consommée sur du matériel ont permis d'établir un premier modèle

de consommation. Ce dernier tient compte des échanges nécessaires à l'établissement d'une communication. Le modèle a ensuite été affiné pour obtenir une modélisation basée sur une chaîne de Markov absorbante qui prend en compte l'environnement et la densité du réseau. Cette étude permet de valider l'utilisation de cette technologie dans différents domaines de l'IoT. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au protocole LoRaWAN. Des mesures de l'énergie consommée sur du matériel ont permis de proposer un nouveau modèle de consommation énergétique qui prend en compte l'environnement du nœud (retransmissions, erreurs et collisions). Finalement, une comparaison des métriques et de la consommation énergétique de ces deux protocoles a été réalisée, afin d'ouvrir une discussion sur les perspectives d'utilisation selon des cas d'usage.

Title: Energy analysis and modeling of IoT communication networks

Keywords: Wireless sensor networks, IoT, Energy consumption, Wi-Fi HaLow, LoRaWAN

Abstract: IoT is an innovative concept that enables objects to exchange data over communications networks. These objects are typically deployed with limited energy resources, and IoT communication protocols must take these constraints into account. In this thesis, we analyzed and modeled the energy consumption of two of the most prominent IoT communication protocols. First, we focused on Wi-Fi HaLow. After a descriptive presentation of this protocol and its mechanisms, performance was studied and characterized. Measurement campaigns showed that it performs well in terms of range, throughput and latency. Analysis of the protocol and measurements of the energy consumed on hardware have enabled us to establish an initial consumption model. This takes

into account the exchanges required to establish a communication. The model was then refined to obtain a model based on an absorbing Markov chain that takes into account the environment and network density. This study validates the use of this technology in various IoT domains. We then turned our attention to the LoRaWAN protocol. Measurements of the energy consumed on hardware enabled us to propose a new energy consumption model that takes into account the node's environment (retransmissions, errors and collisions). Finally, a comparison of the metrics and energy consumption of these two protocols was carried out, in order to open a discussion on the prospects for use cases.