

THESE

Présentée à

L'Université de Lille - Sciences et Technologie

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : ELECTRONIQUE

Par

Sara IBEN JELLAL

Etude du suivi des wagons de fret à des fins logistiques par onde radio Impact des interférences électromagnétiques sur le système proposé

Soutenue le 31 Août 2018 devant la commission d'examen :

- Rapporteurs:** **Catherine ALGANI**, Professeur, CNAM de Paris.
Mohamed HIMDI, Professeur, Ecole Supérieure d'ingénieurs de Rennes.
- Examineurs:** **Bélahcène MAZARI**, Professeur, Ecole d'ingénieurs CESI.
Atika RIVENQ, Professeur, Université Polytechnique des Hauts-de-France.
- Directrice de thèse :** **Sylvie BARANOWSKI**, Maître de conférences HDR, Université de Lille.
- Co-Encadrante :** **Laila CHAKOUR**, Ingénieur de recherche, Université Polytechnique des Hauts-de-France.
- Invité:** **Ahmed RHIAT**, Enseignant chercheur, ICAM site de Lille

A mes parents et ma sœur

*A la mémoire de ma grand-mère qui avait hâte de me voir docteur,
mais qui nous a quittés quelques mois avant*

*A la mémoire de mon grand-père qui m'accompagnait et suivait mon
parcours depuis mon enfance et qui était toujours fier de moi*

Je dédie ce travail.

Remerciements

Je tiens en ce début de mémoire à remercier la région Hauts-de-France et l'Institut Catholique d'Arts et Métiers (ICAM) de Lille d'avoir financé ces travaux de recherche.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma directrice de thèse Mme Sylvie BARANOWSKI, grâce à elle ce travail a pu aboutir. Je la remercie chaleureusement pour sa présence, son soutien inconditionnel, ses qualités humaines et sa confiance qui m'ont accompagnée durant ces années de recherche. Pour sa grandeur d'âme qui me laisse sans mot, je lui en serai reconnaissante toute ma vie.

Je remercie chaleureusement Mme Laila CHAKOUR, pour son soutien, sa disponibilité et sa gentillesse. Je la remercie de m'avoir suivie et encouragée afin de mener à bien mes travaux de recherche.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme Catherine ALGANI, Professeur au CNAM de Paris ainsi qu'à M. Mohamed HIMDI, Professeur à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Rennes de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et d'en être les rapporteurs. Je remercie également M. Bélahcène MAZARI, Professeur à l'Ecole d'Ingénieurs CESI, M. Ahmed RHIAT, enseignant chercheur à l'ICAM site de Lille et Mme. Atika RIVENQ, Professeur à l'Université Polytechnique des Hauts-de-France, d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à M. Yassin ELHILLALI et M. Michael BOCQUET pour leur implication et de répondre présent à chaque fois que j'ai besoin d'aide ou de conseils. J'exprime ma reconnaissance à Mme. Atika RIVENQ pour son soutien ainsi que son accueil et de m'avoir permis d'effectuer mes travaux de thèse dans son équipe.

Je remercie M. Jamal ASSAAD et tous les membres du laboratoire IEMN pour leur accueil chaleureux et les moments agréables partagés.

Je présente également mes remerciements aux membres de ma famille pour leurs accompagnements et encouragements permanents. Mes pensées vont particulièrement à mes chers parents : c'est grâce à eux que je suis devenue ce que je suis aujourd'hui. Les rendre fiers était toujours une priorité et cela me boostait davantage dans les moments difficiles de cette thèse. Je remercie également ma chère sœur pour son énergie positive qu'elle a su me transmettre quand j'en avais besoin.

Enfin, je tiens à remercier vivement mes amis proches : Brahim, Laila, Lamyae et Sélima pour leur écoute, patience et encouragements incessants. Merci pour tous les moments et les fous rires partagés ensemble. Je remercie également : Aymen, Daher, Hatem, Hilal, Rahmed, Tarek et Ulrich qui ont rendu ces années plus agréables. Mes remerciements s'adressent aussi à : Ahmed, Amira, Hassan, Ibrahim, Kais, Marwa, Rudy et Soheyb, pour tous les sourires et les moments de folie partagés ensemble. Je m'en rappellerai toute ma vie.

Tables de matières

Chapitre I : Etat de l'art sur les STI et les systèmes de communication sans fil dans le ferroviaire.

I.1.	INTRODUCTION	23
I.2.	CONTEXTE DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENT FERROVIAIRE	24
I.3.	STI FERROVIAIRE.....	25
I.3.1.	DEFINITION	25
I.3.2.	LIMITES DE FONCTIONNEMENT ET DEPLOIEMENT.....	26
I.4.	PROJETS ET ETUDES PORTANT SUR LA COMMUNICATION FERROVIAIRE	26
I.4.1.	SYSTEME DE CONTROLE DE LA SIGNALISATION ET DE L'ETAT DE L'INFRASTRUCTURE.....	27
I.4.2.	ACCES A INTERNET A BORD DES TRAINS	27
I.4.3.	SYSTEMES DE SURVEILLANCE DE L'ETAT DE ROULEMENT	28
I.4.4.	SYSTEME DE COMMUNICATION SOL-TRAIN	29
I.4.5.	SYSTEMES BASEES SUR LA RFID	30
I.4.6.	SYSTEME DE GESTION DE TRAFIC	30
I.4.7.	SYSTEME DE CONTROLE DES TRAINS EN TEMPS REEL.....	30
I.4.8.	SYSTEME DE SUIVI DE TRAINS DE MARCHANDISES	31
I.5.	PROJETS EUROPEENS	31
I.5.1.	TR@IN-MD (2006-2009)	31
I.5.2.	CORRIDOR (2011-2014).....	32
I.5.3.	MARATHON (2011-2014).....	33
I.5.4.	CONCLUSION	33
I.6.	ETUDE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION SANS FIL	34
I.6.1.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WPAN (WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK).....	34
I.6.1.1.	<i>Le Bluetooth : IEEE 802.15.1</i>	34
I.6.1.2.	<i>WSN (Wireless Sensor Network): IEEE 802.15.4</i>	35
I.6.1.3.	<i>RFID (Radio Frequency IDentification)</i>	35
I.6.1.4.	<i>ULB (Ultra Large Bande)</i>	35
I.6.2.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WLAN (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK)	36
I.6.2.1.	<i>Wi-Fi (IEEE 802.11)</i>	36
I.6.2.2.	<i>HIPERLAN (High Performance Radio LAN)</i>	37
I.6.3.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WMAN (WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK)	38
I.6.4.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WWAN (WIRELESS WIDE AREA NETWORK)	39
I.6.4.1.	<i>GSM (Global System for mobile Communication)</i>	39
I.6.4.2.	<i>GSM-R (GSM for Railway)</i>	40
I.7.	TECHNOLOGIE CHOISIE	40
I.8.	CONCLUSION	42

Chapitre II : Etude du canal de propagation : Wagon- Infrastructure (W-I) et Wagon-Wagon (W-W)

II.1.	CONCEPTS FONDAMENTAUX DE PROPAGATION.....	45
II.1.1	DEFINITION DU CANAL DE PROPAGATION	45
II.1.2	PROPAGATION EN ESPACE LIBRE	47
II.1.3	PROPAGATION EN ENVIRONNEMENT REEL	47
II.1.3.1	<i>Phénomènes physiques intervenants dans la propagation d'une onde</i>	47
II.1.3.2	<i>Propagation par trajets multiples</i>	49
II.1.4	EFFET DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	50
II.1.4.1	<i>Antenne monopôle</i>	50
II.1.4.2	<i>Antenne omnidirectionnelle biconique</i>	51
II.1.4.3	<i>Antenne cornet double-ridge: Horn</i>	52
II.1.4.4	<i>Antenne Patch</i>	53
II.2.	MODELES DE CANAL EXISTANTS : EN OUTDOOR.....	54
II.2.1	MODELE DE CHUANG.....	55
II.2.2	MODELE A DEUX RAYONS	55
II.2.3	MODELE DE PAINTER	56
II.3.	ENVIRONNEMENT FERROVIAIRE ET SES EXIGENCES	57
II.3.1	TYPES DE VEHICULES DE FRET	57
II.3.2	POSITIONNEMENT DES MODULES COMMUNICANTS	60
II.3.2.1	<i>Communication Wagon-Infrastructure</i>	60
II.3.2.2	<i>Communication Wagon-Wagon</i>	63
II.4.	CONTRAINTES ET PERTURBATIONS.....	64
II.4.1.	EFFET DOPPLER.....	65
II.4.2.	CONDITIONS CLIMATIQUES	65
II.4.3.	POUSSIERES	65
II.5.	CONCLUSION	65

Chapitre III : Performances de la solution proposée dans l'environnement de propagation

III.1.	STANDARD ZIGBEE.....	69
III.1.1.	ARCHITECTURE.....	69
III.1.2.	TOPOLOGIE	70
III.1.3.	COUCHE PHY	71
III.1.4.	COUCHE MAC	73
III.1.5.	PRESENTATION DU RESEAU ZIGBEE DEPLOYE	74
III.2.	ETUDE DE LA PROPAGATION WAGON-INFRASTRUCTURE	75
III.2.1.	CARACTERISATION DE LA PROPAGATION A 2.4 GHz EN ESPACE LIBRE	75
III.2.2.	CARACTERISATION DE LA PROPAGATION DU SIGNAL ZIGBEE EN ESPACE LIBRE	76
III.2.3.	CARACTERISATION DE LA PROPAGATION EN PRESENCE DE CONTENEURS	77
III.2.4.	POSITIONNEMENT DES ANTENNES	80
III.2.5.	CONCLUSION	82
III.3.	ETUDE DE LA PROPAGATION WAGON-WAGON.....	83
III.3.1.	CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ENTRE VEHICULES.....	83
III.3.2.	POSITIONNEMENT DES ANTENNES POUR UNE PROPAGATION ENTRE DE VEHICULES.....	84
III.3.3.	POSITIONNEMENT DES ANTENNES POUR UNE PROPAGATION ENTRE CONTENEURS	86
III.3.4.	CONCLUSION	87
III.4.	CONCLUSION	87

Chapitre IV : Les problématiques CEM présentes et étudiées dans l'environnement ferroviaire

IV.1. INTRODUCTION	91
IV.2. PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES PRESENTES DANS LE MILIEU FERROVIAIRE	91
IV.2.1. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR LE MILIEU FERROVIAIRE	91
IV.2.2. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR LES TELECOMS.....	92
IV.2.3. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR DES ATTAQUES INTENTIONNELLES.....	92
IV.3. ETUDE DE L'EFFET DES BRUITS TRANSITOIRES SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	93
IV.3.1. CARACTERISTIQUES DES INTERFERENCES GENEREES PAR UN MAUVAIS CONTACT ENTRE LA CATENAIRE ET LE PANTOGRAPHE.....	93
IV.3.2. MODELISATION DU BRUIT TRANSITOIRE SUSCEPTIBLE D'INTERFERER AVEC LE SYSTEME PROPOSE	94
IV.4. ETUDE DE L'EFFET DES COMMUNICATIONS RADIO SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	97
IV.4.1. INTRODUCTION	97
IV.4.2. CARACTERISTIQUES DU STANDARD WI-FI (IEEE 802.11)	98
IV.4.3. COEXISTENCE WI-FI ET ZIGBEE	99
IV.4.4. MECANISMES ADOPTES PAR ZIGBEE POUR ASSURER LA COEXISTENCE AVEC D'AUTRES SYSTEMES...	100
IV.5. ETUDE DE L'EFFET DU BROUILLAGE SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	102
IV.6. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS	103
IV.6.1. BANC DE MESURE DEVELOPPE	103
IV.6.2. ETUDE DE L'EFFET DE L'EVENEMENT TRANSITOIRE SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	105
IV.6.3. ETUDE DE L'EFFET DES TELECOMS SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	109
IV.6.4. ETUDE DE L'EFFET D'UN BRUIT INTENTIONNEL SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	115
IV.7. CONCLUSION	119
ANNEXE 1 : MODELE OSI.....	125
ANNEXE 2 : TECHNOLOGIES ET NORMES IEEE.....	127
ANNEXE 3: GENERATIONS DE LA NORME IEEE 802.11	129
ANNEXE 4 : CARACTERISATION DU COUPLEUR	131
ANNEXE 5 : DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES ANTENNES ETUDIEES	133
COMMUNICATIONS DE L'AUTEUR EN RELATION AVEC LES TRAVAUX DE THESE	142
RESUME	145
ABSTRACT.....	145

Table des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Répartition du transport ferroviaire de marchandises dangereuses entre 2011 et 2015 [Data16].....	25
Figure I. 2: Structure du projet THDT	28
Figure I. 3: Prototype du projet [Grud14].	28
Figure I. 4: Les deux architectures hiérarchiques proposées dans [Fran13].	29
Figure I. 5: Schéma de communication du projet [Rakj16].	31
Figure I. 6: Architecture du système Tr@in-MD.....	32
Figure I. 7: Architecture du réseau GSM [Germ14]	39

Chapitre II

Figure II. 1: Présentation des canaux de propagation et de transmission	45
Figure II. 2: Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance [Dess11].	46
Figure II. 3: Principe de la réflexion et de la transmission.	48
Figure II. 4: Principe de la diffraction.....	48
Figure II. 5: Principe de la diffusion.	48
Figure II. 6: Propagation par trajets multiples.....	49
Figure II. 7: Antenne monopôle de type PSKN3-24/55 RS.....	50
Figure II. 8: Paramètre S_{11} de l'antenne PSKN3-24/55 RS.....	51
Figure II. 9: L'antenne biconique omnidirectionnelle de type RS0460.....	51
Figure II. 10: Paramètre S_{11} de l'antenne de type RS0460	52
Figure II. 11: Présentation d'une antenne Horn SAS-571.	52
Figure II. 12: Paramètre S_{11} de l'antenne Horn SAS-571.	53
Figure II. 13: Antenne 4-Patches adaptée à 2.45 GHz.....	53
Figure II. 14: Paramètre S_{11} de l'antenne 4-Patches à 2.45 GHz	54
Figure II. 15: Modèle de propagation à 2 rayons	55
Figure II. 16: Propagation par un sol irrégulier.....	56
Figure II. 17 : Wagon tombereau de la SNCF [refw1].....	58
Figure II. 18: Wagon couvert de la SNCF [refw2]	58
Figure II. 19: Wagon plat de la SNCF [refw2].	59
Figure II. 20: Wagon à parois de la SNCF [refw3].	59
Figure II. 21: Wagon citerne de la SNCF [refw3].	59
Figure II. 22: Wagons trémies [refw5].	60
Figure II. 23: Borne installée au niveau de l'infrastructure.	61
Figure II. 24: Portique installé au niveau de l'infrastructure	61
Figure II. 25: Le modèle de propagation à 2-rayons	61
Figure II. 26: Puissance théorique reçue par l'antenne réceptrice en espace libre	62
Figure II. 27: Communication entre train et infrastructure.	62
Figure II. 28: Les scénarios étudiés pour le positionnement des modules de transmission.	63

Chapitre III

Figure III. 1: Pile de protocoles de la technologie ZigBee.....	69
Figure III. 2: Topologies supportées par la technologie ZigBee.....	71
Figure III. 3: Les canaux de IEEE 802.15.4.....	72
Figure III. 4: La trame PHY de la norme IEEE 802.15.4.....	72
Figure III. 5: La trame MAC de la norme IEEE 802.15.4.....	73
Figure III. 6 La chaîne de transmission à 2.4 GHz.....	74
Figure III. 7: Module XBee-PRO.....	74
Figure III. 8: Propagation en espace libre en utilisant des antennes Horn.....	75
Figure III. 9: Puissance reçue par l'antenne Horn en fonction de la distance.....	76
Figure III. 10: Puissance reçue par le module ZigBee en fonction de la distance.....	77
Figure III. 11: Présentations des dimensions du conteneur.....	77
Figure III. 12: Propagation en présence de conteneurs en utilisant des antennes Horn.....	78
Figure III. 13: Puissance reçu par une antenne Horn en présence de conteneurs.....	78
Figure III. 14: Puissance reçue par une antenne monopôle en présence de conteneurs.....	79
Figure III. 15: Comparaison des puissances reçues avec les antennes Horn et les antennes monopôles.....	79
Figure III. 16: Communication train - infrastructure : antenne fixée sur un portique.....	81
Figure III. 17: Communication train - infrastructure : antenne fixée sur le bas-côté le long des rails.....	82
Figure III. 18: Etude de la propagation entre deux véhicules.....	83
Figure III. 19: La puissance reçue en fonction de la distance.....	84
Figure III. 20: Antennes placées entre véhicules à $h = 1.4$ m.....	84
Figure III. 21: Antennes placées entre véhicules à $h = 2.8$ m.....	85
Figure III. 22: Antennes placées au milieu des toits des véhicules.....	85
Figure III. 23: Comparaison entre les puissances reçues dans les 3 scénarios.....	85
Figure III. 24: Antennes placées entre les conteneurs.....	86

Chapitre IV

Figure IV. 1: Forme d'onde de l'évènement transitoire, $D = 5$ ns; $T_M = 0.4$ ns; $A = 0.45$ V.....	94
Figure IV. 2: Spectre de la forme d'onde double exponentielle.....	94
Figure IV. 3: Spectres des deux modélisations.....	95
Figure IV. 4: Impulsions transitoires modélisées.....	96
Figure IV. 5: Oscillogramme du l'impulsion modélisée (Extrapolation jusqu'à 3GHz).....	96
Figure IV.6: Spectre des technologies sans fil susceptibles d'exister dans le domaine ferroviaire.....	97
Figure IV. 7: Le format général de la trame MAC de IEE 802.15.4.....	99
Figure IV. 8: Cohabitation des technologies IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11.....	100
Figure IV. 9: Les chances d'accès au canal de la technologie ZigBee.....	100
Figure IV. 10: Présentation du signal interférent : Balayage en temps et en fréquence.....	103
Figure IV. 11: Configuration du banc de mesure de l'immunité du système ZigBee.....	104
Figure IV. 12: Banc de mesure pour l'étude de l'immunité du signal ZigBee en présence du bruit transitoire.....	105
Figure IV. 13: Banc de mesure des perturbations générées par le bruit transitoire.....	106
Figure IV. 14: Oscillogramme du signal transitoire généré.....	106
Figure IV. 15: Spectre du bruit transitoire mesuré par l'analyseur de spectre.....	107

Figure IV. 16: Bilan de liaison de la transmission ZigBee en présence du bruit.	108
Figure IV. 17: Présentation du scénario: coexistence des réseaux ZigBee et Wi-Fi	110
Figure IV. 18: Le débit dans le cas des deux scénarios.....	111
Figure IV. 19: Délai d'accès au support dans le cas des deux scénarios.	111
Figure IV. 20: Temps de propagation dans le cas des deux scénarios.	112
Figure IV. 21: Banc de mesure de l'immunité du signal ZigBee en présence d'un signal à 2.4 GHz.	113
Figure IV. 22: Banc de mesure des perturbations générées dans la bande ISM	114
Figure IV. 23: Banc de mesure de l'immunité du signal ZigBee en présence d'un signal de brouillage.....	116
Figure IV. 24: Nombre de paquets reçus en présence du bruit balayant.....	116
Figure IV. 25: L'effet du balayage.	117
Figure IV. 26: L'effet du mode de balayage sur les performances du signal ZigBee.....	118
Figure IV. 27: L'effet du balayage en mode continu.	118

Annexes

Figure A. 1: Modèle OSI.....	125
Figure A. 2: Schéma du coupleur JSO-10-471/3S [Jsoh10].	131

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Comparaison des standards IEEE 802.11.	37
Tableau I. 2: Caractéristiques des normes HYPERLAN 1 et HIPERLAN 2.	38
Tableau I. 3: Caractéristiques des technologies sans fil.	41

Chapitre II

Tableau II. 1: Comparaison des antennes étudiées.	54
Tableau II. 2: Résumé de modèles de canal proposés dans la littérature.	57
Tableau II. 3: Comparaison des types de wagons.	60

Chapitre III

Tableau III. 1: Les nominations des dispositifs IEEE 802.15.4 et ZigBee selon leurs fonctionnalités.	70
Tableau III. 2: Les fréquences centrales des canaux de IEEE 802.15.4.	72
Tableau III. 3: Résultats de la comparaison des antennes pour une communication W-I.	80
Tableau III. 4: Puissances reçues selon le positionnement des antennes.	86
Tableau III. 5: Résultats de la comparaison des antennes pour une communication W-W.	87

Chapitre IV

Tableau IV. 1: Bandes de fréquences selon les pays.	98
Tableau IV. 2: Résultats des expérimentations.	108
Tableau IV. 3: Paramètres de simulation.	110
Tableau IV. 4: Résultats des expérimentations sur l'effet de la présence d'un signal dans la même bande de fréquences que ZigBee.	114

Liste des acronymes

A

ACD	Anti-Collision Device
AWGN	Additive White Gaussian Noise

B

BLE	Bluetooth Low Energy
-----	----------------------

C

CA	Collision Avoidance
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique

D

DIFS	Distributed Inter Frame Space
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum

E

ED	Energy Detection
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

F

FFD	Full Fonction Device
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum

G

GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GSM-R	Global System for Mobile communications – Railway

H

HTN	Hybrid Technology Networking
-----	------------------------------

I

ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITS	Intelligent Transportation Systems

L

LAN	Local Area Network
LP-WPAN	Low Power – Wireless Personal Area Network

M

MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
------	--------------------------------

O

O-QPSK	Offset quadrature phase-shift keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection

P

PER	Packet Error Rate
-----	-------------------

Q

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
------	-------------------------------

R

FRD	Reduced Fonction Device
RFID	Radio Frequency Identification

S

SNR	Signal to Noise Ratio
STI	Systèmes de transport Intelligent

T

TCAS	Traffic Collision Avoidance System
TPWS	Train Protection and Warning System

U

ULB	Ultra Large Bande
UWB	Ultra Wide Band

W

Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

INTRODUCTION GENERALE

Les régions sont devenues des autorités organisatrices des transports régionaux en janvier 2002, et depuis, elles assument un nombre croissant de responsabilités dans le domaine du transport public.

Hébergeant une centaine d'entreprises dont les trois grands donneurs d'ordre (Bombardier, Alstom et Siemens), la région Haut-de-France affiche son savoir-faire dans le domaine de l'industrie ferroviaire et ne vole donc pas sa 1^{ère} place en France.

Le positionnement stratégique de la région au cœur de l'Europe, impose des défis qui ne cessent de croître dans le domaine ferroviaire. En effet, la région doit assurer son ouverture à l'Europe plus particulièrement, et au monde plus généralement, en augmentant le nombre de lignes fiables en matière de fret et de transport de voyageurs, en maîtrisant les flux, en assurant le rééquilibrage modal, en gérant les trafics et la logistique, et en assurant la localisation, l'identification et la traçabilité des marchandises transportées.

L'efficacité énergétique est aussi un élément important qui doit être pris en considération. En effet, en octobre 2013, la chambre de commerce et d'industrie de la région Hauts-de-France a présenté le projet stratégique de la 3^{ème} révolution industrielle, élaboré en collaboration avec l'économiste Jeremy Rifkin et, depuis, les entreprises s'engagent à fournir des efforts pour réduire la consommation d'énergie à l'horizon 2020, en proposant des solutions et/ou des produits qui consomment peu.

Aujourd'hui, les entreprises ferroviaires visent également à proposer des solutions complètes, flexibles et personnalisées (sur-mesure) pour fidéliser leurs clients et attirer de nouveaux marchés. Dans le domaine de transport de fret, il est nécessaire d'assurer le suivi des wagons, d'identifier les wagons sensibles (matières dangereuses, denrées périssables...), d'avoir des informations associées comme le poids, la température et la localisation... utiles à la gestion logistique.

Les technologies sans fil permettent d'améliorer les performances des systèmes de communication en termes d'efficacité, de flexibilité et d'évolutivité. Ceci, encourage leur sélection et leur mise en place dans le domaine ferroviaire afin de répondre à ses besoins.

Cependant, l'environnement ferroviaire est un milieu riche en perturbations électromagnétiques. Ces perturbations peuvent être non-intentionnelles, issues par exemple des installations d'alimentation interne, ou bien externes à l'infrastructure ferroviaire (émetteur radio par exemple). D'autres perturbations peuvent aussi être générées intentionnellement à des fins malveillantes.

Le travail développé dans cette thèse est cofinancé par la région Nors-Pas-de-Calais, aujourd'hui appelée Haut-de-France, et l'ICAM (Institut Catholique d'Arts et Métiers) site de Lille.

L'objectif de ce travail est de proposer un système de communication entre wagons par onde radio qui permette de collecter les informations associées aux wagons et de les transmettre vers un point central comme la locomotive (gestion de la traction et du freinage) et la station (gestion logistique). Ce système permet également de localiser les wagons isolés appelé « train du lotissement ».

Ce mémoire est composé de quatre chapitres. Il est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente un état de l'art des systèmes de télécommunications utilisés dans le transport ferroviaire. Nous nous focalisons sur les projets et les systèmes proposés pour le ferroviaire et qui adoptent des technologies de communication sans fil. Par la suite, nous détaillons et comparons les caractéristiques de ces diverses technologies afin d'identifier la plus optimale pour notre application. Cette étude comparative nous oriente vers l'utilisation de réseaux de capteurs se basant sur la technologie ZigBee. Ce choix est argumenté à la fin du chapitre.

- Dans le deuxième chapitre, nous commençons par décrire les mécanismes de propagation (réflexion, diffraction et diffusion). Par la suite, nous présentons les modèles de canaux proposés dans la littérature pour des propagations outdoor. La dernière partie détaille les exigences de l'environnement ferroviaire en terme de structure des wagons dont dépend le positionnement des dispositifs ZigBee, que nous proposons d'utiliser pour une communication Wagon-Infrastructure (W-I) et une communication Wagon-Wagon (W-W).

- Le troisième chapitre est dédié à l'étude de la propagation de signal généré par la technologie ZigBee. Dans la première partie, nous présentons les caractéristiques et les protocoles de communication ZigBee. Par la suite, nous montrons les résultats des mesures réalisées selon différents scénarios afin d'identifier le positionnement optimal des dispositifs. Ceci est nécessaire pour la planification et la mise en place dans un environnement réel.

- Le quatrième chapitre se focalise sur l'étude des perturbations électromagnétiques qui peuvent nuire au système proposé. Ce chapitre est articulé autour de quatre grands axes :

- Dans la première partie, nous nous intéressons à l'étude des perturbations internes au milieu ferroviaire, particulièrement celles générées lors du contact glissant entre la caténaire et le pantographe. Nous définissons la forme de ce bruit impulsionnel susceptible de perturber le système proposé.
- Dans la deuxième partie, nous nous focalisons sur les perturbations externes au milieu ferroviaire et générées par les systèmes de télécommunication environnants. En effet, avec l'évolution des communications sans fil plusieurs systèmes peuvent être mis en place au voisinage de l'infrastructure ferroviaire. Ces systèmes peuvent engendrer des problèmes de cohabitation et de coexistence.

Nous nous intéressons plus particulièrement à l'effet de la présence du Wi-Fi dans le même environnement que notre système, étant donné qu'ils fonctionnent dans la même bande de fréquences et que la puissance d'émission du Wi-Fi reste élevée par rapport aux autres technologies opérant dans cette bande (Bande ISM).

- La troisième partie est dédiée aux perturbations intentionnelles. Dans cette section, nous étudions l'effet du bruit intentionnel. Nous présentons la forme générale d'un brouillage et ses caractéristiques.
- Le dernier axe présente le banc de mesure qui a été développé afin d'étudier l'effet des perturbations définies dans les parties précédentes sur le système proposé. Ensuite, nous présentons les résultats des mesures réalisées permettant de définir les limites et les rapports de puissances à respecter pour garantir la communication.

Chapitre I :

Etat de l'art sur les STI et les systèmes de communication sans fil dans le ferroviaire.

I.1.	INTRODUCTION	23
I.2.	CONTEXTE DES SYSTEMES DE TRANSPORT INTELLIGENT FERROVIAIRE	24
I.3.	STI FERROVIAIRE.....	25
I.3.1.	DEFINITION	25
I.3.2.	LIMITES DE FONCTIONNEMENT ET DEPLOIEMENT.....	26
I.4.	PROJETS ET ETUDES PORTANT SUR LA COMMUNICATION FERROVIAIRE	26
I.4.1.	SYSTEME DE CONTROLE DE LA SIGNALISATION ET DE L'ETAT DE L'INFRASTRUCTURE.....	27
I.4.2.	ACCES A INTERNET A BORD DES TRAINS	27
I.4.3.	SYSTEMES DE SURVEILLANCE DE L'ETAT DE ROULEMENT	28
I.4.4.	SYSTEME DE COMMUNICATION SOL-TRAIN	29
I.4.5.	SYSTEMES BASEES SUR LA RFID	30
I.4.6.	SYSTEME DE GESTION DE TRAFIC	30
I.4.7.	SYSTEME DE CONTROLE DES TRAINS EN TEMPS REEL.....	30
I.4.8.	SYSTEME DE SUIVI DE TRAINS DE MARCHANDISES	31
I.5.	PROJETS EUROPEENS	31
I.5.1.	TR@IN-MD (2006-2009)	31
I.5.2.	CORRIDOR (2011-2014).....	32
I.5.3.	MARATHON (2011-2014).....	33
I.5.4.	CONCLUSION	33
I.6.	ETUDE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION SANS FIL	34
I.6.1.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WPAN (WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK).....	34
I.6.1.1.	<i>Le Bluetooth : IEEE 802.15.1</i>	34
I.6.1.2.	<i>WSN (Wireless Sensor Network): IEEE 802.15.4</i>	35
I.6.1.3.	<i>RFID (Radio Frequency IDentification)</i>	35
I.6.1.4.	<i>ULB (Ultra Large Bande)</i>	35
I.6.2.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WLAN (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK)	36
I.6.2.1.	<i>Wi-Fi (IEEE 802.11)</i>	36
I.6.2.2.	<i>HIPERLAN (High Performance Radio LAN)</i>	37
I.6.3.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WMAN (WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK)	38
I.6.4.	LES SYSTEMES BASES SUR LES RESEAUX WWAN (WIRELESS WIDE AREA NETWORK).....	39
I.6.4.1.	<i>GSM (Global System for mobile Communication)</i>	39
I.6.4.2.	<i>GSM-R (GSM for Railway)</i>	40
I.7.	TECHNOLOGIE CHOISIE	40
I.8.	CONCLUSION	42

I.1. Introduction

Pendant ces dernières années, et avec l'évolution technologique, les entreprises de l'industrie ferroviaire se sont intéressées à intégrer les solutions sans fil dans leurs systèmes, pour proposer de nouvelles applications et fonctionnalités afin d'augmenter les performances en termes de sécurité, de capacité, de confort et d'aide à la décision. Ces solutions sont mises en place à bord des trains et au niveau de l'infrastructure. Les technologies déployées diffèrent selon le contexte et l'application, et le défi reste de trouver le compromis pour proposer la solution la plus optimale.

Dans une vision globale, les solutions sans fil permettent de faire communiquer les objets distants sans avoir besoin de câbles et sans une intervention humaine pour traiter des données, prendre des décisions, ou envoyer des informations et des commandes. Ces fonctionnalités rendent ces objets « intelligents » dans le sens où ils sont capables d'opérer de manière autonome.

Les solutions sans fil offrent plusieurs avantages dans le ferroviaire en terme de mobilité et de flexibilité pour la récupération de l'information, par exemple, une facilité de gestion qui est nécessaire pour changer et déplacer un wagon d'un train à l'autre, et une souplesse d'installation permettant d'adapter la mise en place en fonction des besoins et des contraintes. Ainsi, ces solutions offrent un coût d'installation qui reste avantageux par rapport aux réseaux câblés. Le « sans-fil » est aussi une solution évolutive, offrant une facilité d'extension ou de restriction qui permet d'avoir en général la couverture correspondant aux besoins réels.

Le milieu ferroviaire est un environnement riche en sources de perturbations électromagnétiques. En effet, la cohabitation au sein de l'environnement ferroviaire de systèmes fonctionnant sur des fortes puissances et des systèmes de communication et de contrôle-commande à faible tension, rend ce milieu très sujet à des problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM). Les équipements ferroviaires peuvent aussi être soumis à des perturbations électromagnétiques extérieures à cet environnement, notamment à proximité des émetteurs de signaux RF situés dans le voisinage de l'infrastructure ferroviaire [Slim09]. Tous ces facteurs, rendent la communication par onde radio entre wagons plus complexe. En outre, plusieurs phénomènes physiques interviennent dans le canal de propagation en milieu ferroviaire. La présence des surfaces métalliques des wagons induit des réflexions et des diffractions de l'onde électromagnétique, et donc la dispersion de la puissance du signal. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet de cette thèse. En effet, l'objectif est de proposer une communication sans fil entre wagons de fret, afin d'assurer leur suivi et de récupérer les informations associées et de les transmettre vers un point central comme la locomotive. Le but est d'identifier la technologie la plus prometteuse pour assurer cette communication en prenant en considération les contraintes de l'environnement ferroviaire.

I.2. Contexte des Systèmes de Transport Intelligent ferroviaire

Dans ce domaine du transport ferroviaire de marchandises (fret), l'acheminement en temps et en heure doit être la préoccupation première d'une entreprise ferroviaire. Il est également nécessaire de bien identifier les wagons sensibles (transportant de la matière dangereuse, des denrées périssables, ...), et d'avoir des informations directement liées aux wagons (contenu, poids, dimensions, localisation, ...) utiles à la gestion logistique et à la composition des trains. Un dialogue entre les wagons et la locomotive et/ou avec l'infrastructure permettra de collecter les informations de chaque wagon par un point central, afin d'assurer la traçabilité vers le poste de gestion logistique. Ce dispositif pourra en plus être utilisé pour améliorer la gestion des flux logistiques, notamment en identifiant les coupons de wagons ne devant pas être séparés. Ces wagons doivent être suivis pour éviter qu'ils ne soient isolés et par conséquent, vérifier l'intégrité du train avant le roulement.

La plupart des projets et travaux de recherche réalisés aujourd'hui dans le domaine ferroviaire sur les trains de voyageurs, ont comme objet de garantir plus de confort et d'attractivité à leurs clients. Assurer le service d'internet pour les voyageurs était l'objectif de plusieurs projets. En revanche, l'évolution de la 4G et bientôt la 5G, offrant cela, les objectifs s'orientent plus vers des besoins en terme de sécurité et de gestion logistique, ce qui reste primordial bien évidemment pour les trains de fret.

Le ferroviaire joue un rôle très important dans le transport de marchandises. Les besoins en termes de fiabilité des applications mises en place et la demande de l'implémentation de nouveaux services ne cessent de croître. Par conséquent, des mesures de sécurité, de contrôle et de logistique sont de plus en plus nécessaires.

L'introduction de nouvelles approches pour un transport plus efficace et plus durable, et en particulier dans le fret ferroviaire, constitue depuis 25 ans un volet essentiel de la politique de l'Union Européenne [Tfue16].

Un financement à hauteur de 28 milliards d'euros entre 2007 et 2013 devait contribuer à développer le transport de marchandises. Globalement, la performance constatée reste insuffisante, tandis que la position du transport routier s'est renforcée.

Les transports de fret par voie ferroviaire et l'usage du multimodal connaîtront une progression à moyen et long terme sur les longues distances [Data16]. A ce jour, les offres d'exploitation ferroviaire sont encore marginales et ne représentent pas une alternative appropriée pour les transporteurs et organisateurs de transport surtout en terme de réglementation et gestion logistique.

Actuellement en France, et selon les statistiques publiés en 2016 par le commissariat général au développement durable, le transport de marchandises dangereuses par chemin de fer a progressé de 12,0 % en 2015 et s'est établi au niveau de 5,4 milliards de tonnes-

kilomètres. La part de cette catégorie de transport dans l'ensemble du fret ferroviaire s'est élevée à 16 %. Le transport de matières liquides inflammables qui représente 59% du transport de marchandises dangereuses a augmenté de 10,2 % en 2015 [Data16]. Cette répartition est schématisée dans la figure suivante (figure I.1). Certes, ces statistiques accessibles sur [data16] datent de 2015, cependant elles permettent d'avoir une vision globale sur le marché du transport de marchandises en France.

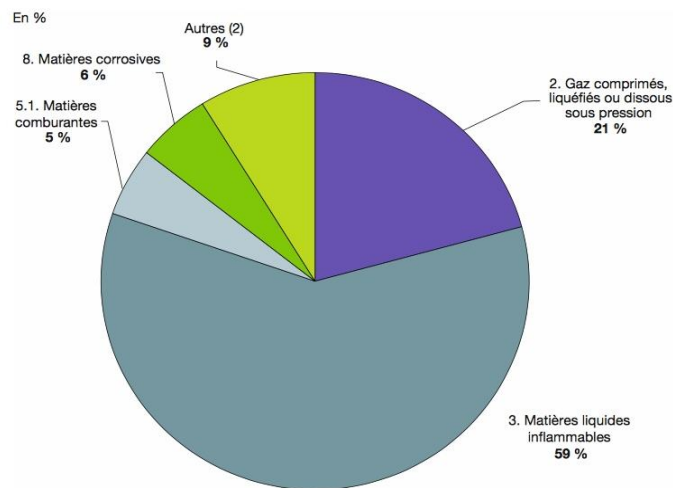


Figure I. 1: Répartition du transport ferroviaire de marchandises dangereuses entre 2011 et 2015 [Data16].

Les travaux de recherche de cette thèse visent à proposer une solution intelligente et durable pour faciliter la gestion logistique des trains de fret.

Les wagons de fret doivent être suivis et surveillés afin de garantir les exigences en terme de température, humidité etc. De plus, ces wagons doivent être à l'abri de personnes tierces, pour contrer tout risque potentiel.

Dans la littérature, la plupart des travaux de recherche sur les transmissions sans fil dans le ferroviaire s'orientent vers des scénarios de communication radio entre le train et l'infrastructure tout le long des voies, tandis que quelques-uns considèrent les systèmes de transmission sans fil à bord du train.

L'étude de différentes publications et projets menés nous permettra d'identifier les critères de choix de la technologie et justifier les orientations à prendre.

I.3. STI ferroviaire

I.3.1. Définition

Les Systèmes de Transport Intelligent (STI) reposent sur l'utilisation de technologies de l'information et de communication dans les systèmes de transport à bord des véhicules routiers et dans le ferroviaire [Rtsi12].

Les STI sont appliqués dans le ferroviaire pour :

- le développement de systèmes d'aide à la conduite : Les systèmes d'aide à la conduite permettent d'aider le conducteur à éviter une situation de risque, un accident et/ou à en minimiser les conséquences, des appels d'urgence, une assistance au freinage, des systèmes régulateurs de vitesse en sont des exemples.
- l'évaluation et l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes ferroviaires : Des systèmes embarqués sont mis en place pour la surveillance du matériel roulant nécessaire pour la maintenance préventive.
- la gestion du trafic et du fret : Plusieurs services sont déployés pour gérer le trafic ferroviaire, par exemple, la gestion dynamique des voies, la gestion des incidents, la maîtrise des poids de wagons, le suivi des marchandises et de la matière dangereuse.

I.3.2. Limites de fonctionnement et déploiement

Les STI répondent à des besoins qui ne cessent de croître. En effet, avec l'évolution des techniques de communication à bas coût, plusieurs solutions sont présentées pour assurer la sécurité et améliorer les services proposés dans l'industrie ferroviaire. Certes, plusieurs avantages sont offerts par les STI, cependant, ils sont confrontés à diverses limites et freins à leur développement. La multiplication des acteurs intervenants, les différentes solutions proposées, les technologies adoptées ainsi que le manque d'interopérabilité des dispositifs existants constituent des exemples de ces limites [Trin12].

L'intégration de nouveaux services dans le milieu ferroviaire exige des expériences sur le terrain pour les valider. En effet, le milieu ferroviaire est un milieu particulier, riche en perturbations et exigeant au niveau de la sécurité, d'où la nécessité de tester les solutions en situation réelle pour étudier tous les aspects qui peuvent les impacter. En revanche, ces expériences en milieu réel sont difficilement accessibles.

L'objectif de cette thèse est de proposer un système qui fonctionne dans l'environnement ferroviaire réel. En effet, nous prenons en compte dans notre étude les perturbations présentes dans le milieu ferroviaire et pouvant impacter la performance de la solution proposée. Ceci sera validé par des simulations et des campagnes de mesure.

I.4. Projets et études portant sur la communication ferroviaire

Dans ce paragraphe, nous énumérons les projets et les systèmes existants à l'échelle internationale qui intègrent un système de communication sans fil dans le milieu ferroviaire, par la suite nous citerons les projets phares élaborés à l'échelle européenne dédiés au train de fret.

I.4.1. Système de contrôle de la signalisation et de l'état de l'infrastructure

L'évolution des technologies de communication a permis de proposer un système sans fil de surveillance de la signalisation de chemin de fer et du contrôle de l'état des infrastructures [Liuk08]. Ce système propose une architecture, qui en temps réel, inspecte simultanément les trains et l'infrastructure. L'ensemble du système est constitué d'une commande à distance et plusieurs unités de contrôle. Un ordinateur incorporant un émetteur-récepteur communique avec l'unité de contrôle la plus proche ce qui permet d'obtenir des données de toutes les unités de surveillance et d'envoyer les commandes (de contrôle) aux unités de contrôle. Ces dernières sont utilisées pour recueillir toutes sortes d'informations sur l'état des voies et la signalisation. Cette architecture peut être proposée pour un système qui communique en Wi-Fi, ZigBee ou Bluetooth.

I.4.2. Accès à Internet à bord des trains

Le Wi-Fi est mis en place depuis mai 2008 dans les trains Thalys (à destination de Paris, Bruxelles, Amsterdam et Cologne) pour offrir le service d'accès à Internet aux voyageurs. Ce confort est obtenu grâce à l'utilisation combinée d'une liaison satellite et d'un réseau Wi-Fi à terre. Néanmoins, l'inconvénient principal de cette liaison réside toutefois dans le faible débit effectif : 5 Mbit/s à partager entre les 360 personnes qui se trouvent dans une seule rame.

Notre étude bibliographique a montré que la communication sans fil entre les wagons a été proposée afin de permettre un accès à Internet à bord des trains au Japon [Mana10]. Dans ce système, le Wi-Fi est utilisé pour établir la connexion entre une station terrestre et le train. Des points d'accès Wi-Fi sont déployés tout le long de la voie ferrée et forment ainsi une zone continue du réseau. Dans le train, le Wi-Fi-5 GHz est utilisé pour connecter des compartiments voisins, et le Wi-Fi-2.4 GHz est utilisé pour connecter des terminaux d'utilisateurs aux points d'accès installés sur le train.

La technologie WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) a été aussi proposée dans le ferroviaire pour permettre d'augmenter le débit effectif à 18 Mbits/s au lieu des 5 Mbits/s fournis par le Wi-Fi. Cette solution était proposée dans le cadre du projet THDT [Zhan11]. Le projet THDT (Très Haut Débit dans les Trains), dont la structure est présentée dans la figure I.2, consiste à fournir du très haut débit par une voie terrestre hertzienne sur deux liaisons ferrées du Limousin. Le département Ondes et Systèmes Associés XLIM de l'université de Limoges a collaboré avec des partenaires industriels pour améliorer le confort dans les trains limousins. L'objectif est de permettre aux voyageurs d'utiliser leurs équipements personnels à bord, tout en ayant accès à des applications à haut débit.

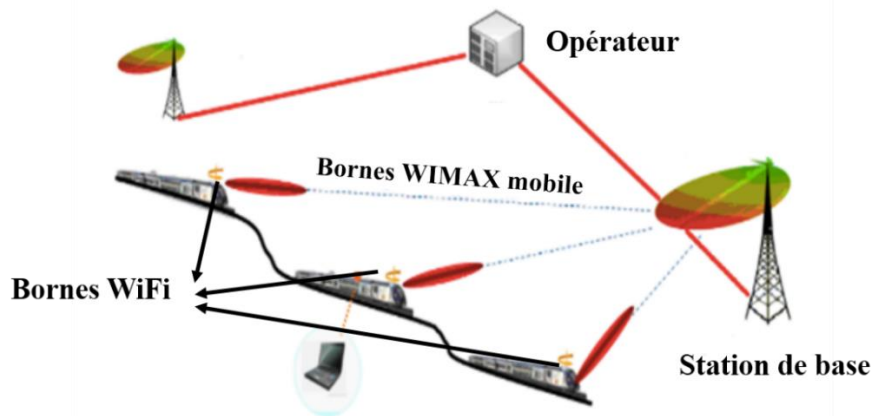


Figure I. 2: Structure du projet THDT

I.4.3. Systèmes de surveillance de l'état de roulement

Dans le système ferroviaire suédois, plusieurs capteurs stationnaires sont placés dans tout le pays, surveillant ainsi l'état de roulement (Détecter la surchauffe des roues de roulement). Plutôt que de surveiller les paliers à des endroits fixes, un réseau de capteurs sans fil WSN (Wireless Sensor Network) est déployé pour une surveillance en permanence même pendant le roulement. Deux aspects sont étudiés dans ce système : la propagation des ondes autour du train et la récupération d'énergie pour assurer l'autonomie énergétique. Des essais sur le terrain avec un prototype de réseau de capteurs sont également présentés dans [Grud09] et [Grud14]. Deux liaisons sans fil ont été utilisées: le WSN à 2.45 GHz à bord des wagons, et la RFID à 868 MHz pour communiquer avec l'infrastructure. Le prototype de ce projet est présenté dans la figure suivante.

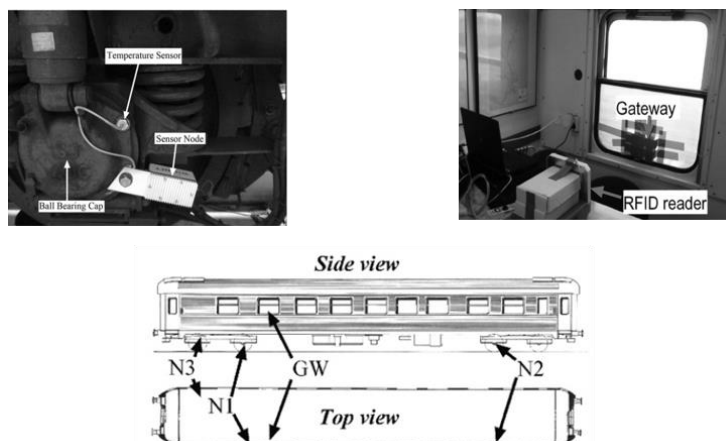


Figure I. 3: Prototype du projet [Grud14].

La surveillance prédictive des wagons de train peut permettre d'anticiper un dysfonctionnement dû à l'usure et d'éviter les éventuels accidents. Afin d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité à bord du train, une solution basée sur le Wi-Fi et WSN est proposée dans [Fran13].

Cette solution permet de faire un suivi en temps réel de la température et de l'état des boggies. Les auteurs considèrent une architecture hiérarchique à deux niveaux en deux versions selon la topologie du réseau : maillée quand plusieurs sauts sont nécessaires pour transmettre l'information, ou étoile dans le cas où le nœud de collecte est dans la même zone de couverture que les nœuds de détection, et donc un seul saut suffit. Ces deux architectures sont illustrées dans la figure I.3.

La différence entre une solution se basant sur WSN et la solution proposée combinant WSN et Wi-Fi, consiste à déployer un nœud de collecte (Sink Node) unique dans la locomotive dans la première solution, tandis que plusieurs sont déployés dans la deuxième solution.

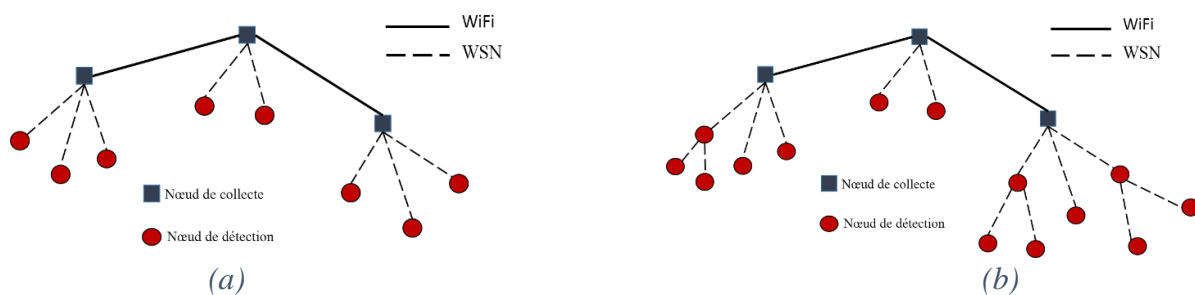


Figure I. 4: Les deux architectures hiérarchiques proposées dans [Fran13].

- (a) Architecture en étoile
- (b) Architecture maillée

Une comparaison des performances est fournie en fonction des résultats de la simulation. Cette dernière démontre que l'utilisation combinée de WSN et Wi-Fi dans une architecture hiérarchique est adéquate pour la composition linéaire des trains. La puissance de transmission, la technologie utilisée pour la communication et la sensibilité de récepteur varient selon le scénario du test. En effet, la puissance de transmission augmente si la topologie est en étoile et diminue dans le cas d'une topologie maillée.

I.4.4. Système de communication sol-train

Une étude de la mise en place de technologies à faible puissance dans des TGV (trains à grande vitesse) a été réalisée, pour assurer une communication bidirectionnelle sol-train [Higu12]. Les résultats des expériences effectuées sur une ligne ferroviaire à grande vitesse (300 km/h) entre Madrid et Barcelone, ont montré que le réseau de capteurs (WSN : Wireless Sensors Network) est une solution compétitive et répond aux besoins de l'application. En effet, les technologies comme Wi-Fi et Bluetooth consomment plus d'énergie et présentent un protocole de communication plus complexe. Un système WSN, quant à lui, reste beaucoup plus simple. Les essais sur le terrain ont démontré que les technologies Bluetooth et WSN sont adaptées aux environnements de train à grande vitesse.

I.4.5. Systèmes basés sur la RFID

La RFID est également une des technologies les plus répandues dans le ferroviaire. Certes la RFID est une technologie assez ancienne mais elle s'est répandue dernièrement. Une étude des différentes applications RFID dans le domaine ferroviaire a été présentée dans [Mala14]. Ces applications sont mises en place en général pour : assurer la sécurité, localiser les trains, assurer leurs maintenances préventives, mesurer la température, inspecter les voies, surveiller l'état du matériel, etc.

Les différents systèmes mis en place antérieurement sont : TPWS (Train Protection and Warning System), TCAS (Traffic Collision Avoidance System) et ACD (Anti-Collision Device). Ces systèmes sont principalement basés sur la technologie GPS qui ne fonctionne pas dans les zones impénétrables telles que les tunnels. Dans ce contexte, les systèmes basés sur la RFID présentent une solution alternative. La solution proposée permet de suivre les trains et d'identifier ceux circulant sur la même voie afin d'éviter les collisions. La technologie RFID permet de lire (avec un Reader RFID) les identifiants (ID) attribués par les « Tags » RFID à chaque train. L'information est transmise par la suite aux conducteurs et aux stations pour éviter la collision.

I.4.6. Système de gestion de trafic

Dans [Bans13], les auteurs proposent une solution basée sur RFID (Radio Frequency Identification) et ZigBee pour la gestion des flux des trains en Inde. L'attribution de la voie libre dans les stations se base sur un mécanisme de jeton, se fait sur une estimation de temps qui, avec une erreur mineure peut entraîner un manque de coordination et cause ainsi des accidents. Un accident de ce genre a eu lieu lors de l'inauguration de l'Indore-Gwalior Intercity Express le 20 septembre 2010, provoqué par un train de marchandises à la gare de Badarwas (Shivpuri, Madhya Pradesh). Cet accident a fait 33 mort et 160 blessés. La solution proposée consiste à envoyer l'identifiant de chaque train vers le serveur associé à la station, qui identifie et alloue la voie libre au train. Un écran LCD affiche le numéro de la voie libre et les informations associées au conducteur.

I.4.7. Système de contrôle des trains en temps réel

La technologie hybride HTN (Hybrid Technology Networking) qui exploite le Wi-Fi et le ZigBee simultanément dans le même réseau, a été déployée dans le train [Shre14]. L'objectif est d'assurer la surveillance et le contrôle en temps réel des trains du nord-américain. Ce système est basé sur l'association de plusieurs petits réseaux (clusters) de capteurs ZigBee via des liaisons Wi-Fi. Evidemment, la faible dimension d'un cluster améliore les performances étant donné qu'elle diminue le nombre de modules ZigBee nécessaires pour transmettre les données. En revanche, le Wi-Fi consomme plus d'énergie pour transmettre l'information. Ce projet a permis d'améliorer la fiabilité et l'efficacité des trains de fret ainsi que des voyageurs.

I.4.8. Système de suivi de trains de marchandises

Rakshit et al. proposent la solution HTN se basant sur les deux technologies Wi-Fi et ZigBee. Le schéma du système est représenté dans la figure I.5. Les auteurs démontrent que la combinaison de ces deux technologies permet de profiter des avantages des deux, tout en dépassant leurs limites. Les nœuds sont organisés en groupes « clusters ». Ces derniers communiquent en interne de manière efficace à l'aide de ZigBee afin de gérer le réseau local et d'envoyer les données à la passerelle du cluster. La communication entre les passerelles du cluster et la locomotive est réalisée grâce à des liaisons Wi-Fi à longue portée. Cela entraîne une réduction du nombre de sauts requis pour envoyer un message, généralement de l'ordre de 85%, et permet de bénéficier des avantages associés tels qu'un routage rapide et optimal et un taux de perte d'information plus faibles.

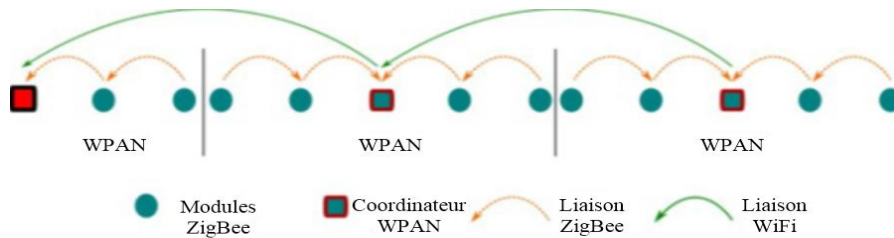


Figure I. 5: Schéma de communication du projet [Rakj16].

I.5. Projets européens

I.5.1. Tr@in-MD (2006-2009)

Le projet Tra@in-MD (Transport Intelligent pour les Marchandises Dangereuses) est un projet français soutenu par le PREDIT. Il a été mené par la SNCF, au sein d'un consortium multipartenaire [Geof10]. L'objectif était de renforcer la sécurité du transport des matières dangereuses par train et assurer sa traçabilité. Tr@in-MD est un système qui permet de suivre les wagons, surveiller leur état tout en transmettant et analysant les informations collectées en temps réel. Ce projet se base sur la localisation GPS et une communication GSM, comme montré dans la figure suivante (figure I.6).

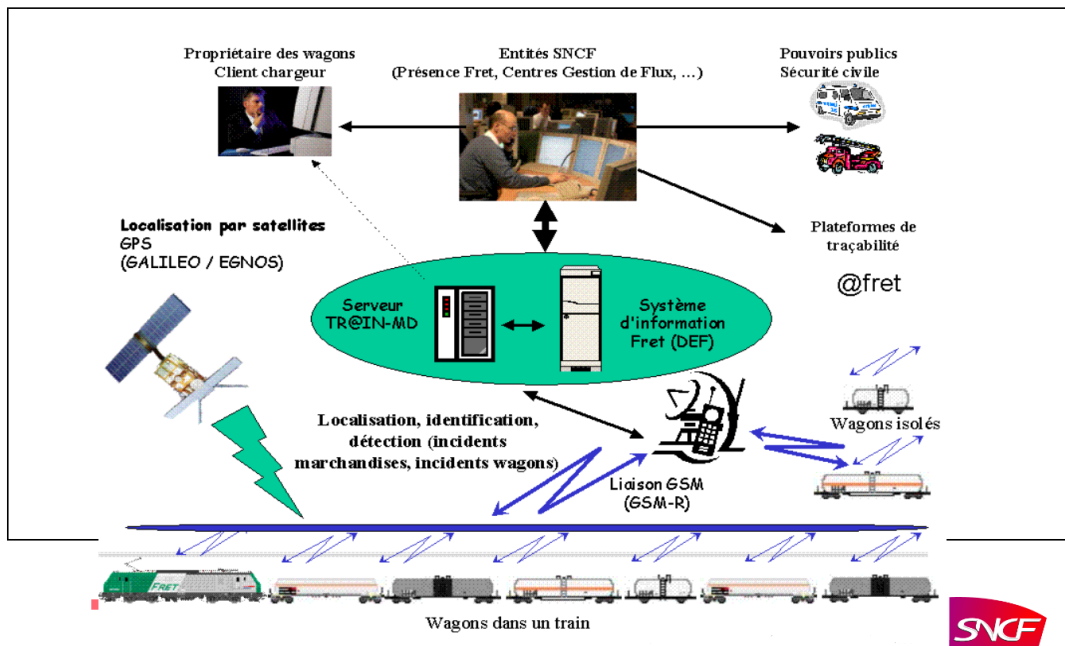


Figure I. 6: Architecture du système Tr@in-MD.

Les technologies déployées dans ce projet présentent certaines limites. En effet, Le GPS est une technologie efficace pour la localisation. En revanche, la liaison satellitaire exige une visibilité directe, ce qui n'est pas toujours accessible en présence des tunnels. Quant à la technologie GSM, elle nécessite une installation particulière qui peut être coûteuse.

I.5.2. CORRIDOR (2011-2014)

La communication sans fil devient de plus en plus un élément clé dans le domaine ferroviaire. Les services ne cessent de croître en terme de contrôle de circulation, de surveillance des voies et d'offres de nouveaux services tel que l'accès à Internet à bord. La présence de multiples solutions de communication sans fil installées à bord ou tout le long des voies entraîne des problèmes de coexistence et d'interopérabilité. Le projet CORRIDOR [Corr11] est un projet qui répond à ce besoin en adoptant le concept de « radio intelligente ». Cette solution permet d'utiliser au mieux les fréquences et canaux disponibles pour une communication fiable, sûre et n'influençant pas les autres communications existantes dans un même environnement.

Le projet CORRIDOR de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) constitue le premier projet en France dédié aux systèmes de Radio Cognitive pour des applications ferroviaires. Il prend en considération les applications GSM-R (Global System for Mobile communication - Railway), surveillance et Internet à bord.

Les problèmes de coexistence et d'interopérabilité s'imposent de plus en plus dans le monde connecté. Plusieurs applications déployant différentes technologies sont proposées, et dans la plupart des cas, la cohabitation entre ces réseaux sans fil n'est généralement pas coordonnée, et le fonctionnement d'un réseau peut nuire aux autres. Cet aspect sera pris en compte et étudié pour le système proposé dans cette thèse.

I.5.3. MARATHON (2011-2014)

Le projet MARATHON (MAke RAil The HOpe for protecting Nature), financé par l'Union Européenne, vise à concevoir de nouvelles techniques afin de faire circuler des trains longs, en assurant la sécurité et le respect des réglementations [Mara14]. Un train de marchandises long de 1 500 mètres marque le début d'une révolution dans le fret en Europe et permet au fret ferroviaire d'être plus compétitif et plus efficace tout en réduisant les coûts. Deux convois allant vers la même destination ont été reliés dans le cadre du projet MARATHON, la motrice du second convoi se retrouvant ainsi au milieu du train. Cette locomotive esclave est contrôlée par onde radio, depuis la locomotive de tête. La liaison radio installée est destinée à transmettre des données de type contrôle-commande à 450 MHz avec une redondance à 2.4 GHz. Un nouveau système de freinage a été conçu pour réduire les risques de déraillement. Une interface informatisée gère les signaux entre les deux locomotives.

Certes, ce projet permet de réduire le coût du transport de fret, néanmoins plusieurs défis s'imposent. Ces défis touchent principalement le suivi et la traçabilité des wagons, ainsi que leur localisation. La solution proposée dans notre projet, répond à ce besoin.

I.5.4. Conclusion

Comme nous l'avons cité, la plupart des sujets de recherche déployant la communication sans fil dans le ferroviaire s'intéressent à la communication train-infrastructure. D'autres projets sont orientés vers l'implémentation de solutions de communication à bord de train et sont dédiées à la surveillance d'état (température, vitesse, maintenance). Néanmoins, à notre connaissance, peu de laboratoires se sont intéressés à la mise en place d'une communication sans fil entre chacun des wagons d'un même train, pour récupérer les données associées aux wagons et leurs contenus afin de remonter l'information vers un point central (Ordinateur de gestion, locomotive...). En effet, la solution proposée dans le projet Tr@in-MD, permet de suivre les wagons et les localiser avec la technique GPS, les surveiller et envoyer les informations collectées en se basant sur une communication GSM. Cette solution, a ses limites en terme de services offerts et l'infrastructure à mettre en place peut être coûteuse.

Dans le cadre de cette thèse, une solution sans fil assurant la communication entre wagons et entre wagons et infrastructure est proposée. L'objectif est d'assurer le suivi et le contrôle des wagons de fret, vérifier leur présence et leur intégrité avant le roulement, ainsi qu'identifier ceux transportant de la matière dangereuse. Avec le même dispositif, ces informations collectées seront envoyées vers le point central via une liaison wagons-locomotive et wagon-infrastructure afin d'assurer la gestion des trains de fret et la localisation des wagons isolés. En outre, la communication entre wagons pourra permettre d'assurer l'accouplement automatique des wagons, chose qui se fait aujourd'hui mécaniquement et présente un danger pour l'agent responsable. L'objectif est de proposer une solution à bas coût, à longue durée de vie donc avec une faible consommation énergétique.

Le premier défi de notre projet de thèse est d'identifier la technologie sans fil qui présente la solution optimale dans le contexte envisagé. Dans le prochain paragraphe une étude comparative des technologies prometteuses est réalisée.

I.6. Etude comparative des technologies de communication sans fil

I.6.1. Les systèmes basés sur les réseaux WPAN (Wireless Personal Area Network)

Au cours des dernières années, les réseaux PAN ont progressé rapidement surtout avec les technologies de communication sans fil à faible coût et à faible consommation d'énergie, tels que le Bluetooth, le ZigBee et la RFID, opérant sur la bande ISM (Industrial, Scientific and Medical), qui est destinée aux communications à courte portée dans la bande 2 400 à 2 483 MHz. Ces technologies deviennent de plus en plus matures, permettant ainsi de développer un système sans fil afin de surveiller et de contrôler les wagons.

I.6.1.1. Le Bluetooth : IEEE 802.15.1

Le Bluetooth est une technologie sans fil très populaire définie par la norme IEEE 802.15.1 (Annexe 2). C'est une technologie conçue pour remplacer les câbles de périphériques informatiques, tels que les souris, les claviers, les manettes de jeux, et les imprimantes. Cette technologie est souvent utilisée dans les téléphones mobiles grâce à sa coexistence avec d'autres dispositifs fonctionnant dans la bande de fréquences ISM. Le Bluetooth est basé sur des techniques de réduction des interférences utilisant le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Cela permet d'éviter les canaux occupés par d'autres appareils sans fil à proximité dans la zone de couverture [Leej07]. Le FHSS est également utilisé par le Wi-Fi, par contre les séquences de sauts sont différentes pour éviter toutes les interférences avec le FHSS du Bluetooth.

Plusieurs versions du standard IEEE 802.15.1 se sont succédées depuis son apparition. La plus récente est le Bluetooth 4.0, créé en 2010 et appelé BLE (Bluetooth Low Energy). Cette version commercialisée sous le nom de « Bluetooth Smart » inclut une fonctionnalité de faible énergie et permet d'optimiser la durée de vie des produits. Le Bluetooth classique utilise 79 canaux séparés de 1 MHz. Le BLE utilise seulement 40 canaux espacés de 2 MHz, dont trois sont appelés « Advertising Channels » et qui permettent la découverte de périphériques et l'établissement d'une éventuelle connexion. Les 37 canaux restants sont utilisés pour une communication bidirectionnelle pour transmettre les données.

Le BLE utilise le saut de fréquence tout comme le Bluetooth classique, mais celui-ci est adaptatif. Ce mécanisme sélectionne l'un des 37 canaux disponibles pendant un intervalle de temps donné.

I.6.1.2. WSN (Wireless Sensor Network): IEEE 802.15.4

Le standard IEEE 802.15.4 (Annexe 2) définit la sous-couche de contrôle d'accès (MAC) et la couche physique pour les réseaux WPAN. Le protocole IEEE 802.15.4 cible les applications à bas débit, faible consommation d'énergie et faible coût, qui correspondent généralement aux exigences des réseaux de capteurs. Le protocole IEEE 802.15.4 est principalement associé à la technologie ZigBee. En effet, ZigBee Alliance, qui est une communauté industrielle, a travaillé en collaboration avec l'IEEE (groupe de travail 4) afin de spécifier une pile de protocoles complète à faible coût et à faible puissance [Anis05].

La technologie ZigBee maintient les couches PHY et MAC de l'IEEE 802.15.4, mais, définit en plus le routage, la sécurité et le contrôle d'application au niveau des couches supérieures. En conséquence, ces spécifications présentent plus de complexité par rapport à l'IEEE 802.15.4, mais fournissent une meilleure fiabilité et interopérabilité et prennent en charge les topologies de réseau les plus complexes.

I.6.1.3. RFID (Radio Frequency Identification)

Le principe de la technologie RFID est basé sur l'utilisation d'étiquettes radio qui peuvent être fixées sur des objets et d'un lecteur radio fixé généralement sur le mobile avec lequel on souhaite récupérer des données. Ces dernières permettent d'identifier l'objet, collecter les informations associées ou/et estimer sa position. Le choix est fait en fonction de la taille de la zone à couvrir, du nombre d'objets et du coût prévu pour l'infrastructure. En approchant une étiquette d'un mobile d'une borne équipée d'un lecteur RFID, celui-ci fournit l'information ou la position géographique grâce à un échange de signaux radio. La portée de ces étiquettes radio dépend de leur fréquence et de leur type d'alimentation. Une étiquette active qui contient sa propre alimentation possède une portée supérieure comparée à une étiquette passive. Cependant, la portée d'un système RFID reste limitée et varie en général de quelques centimètres à une dizaine de mètres au maximum. Grâce à son faible coût, cette technique est très utilisée aujourd'hui, notamment dans le domaine industriel, pour la localisation et la gestion des marchandises.

I.6.1.4. ULB (Ultra Large Bande)

L'ULB (ou UWB pour Ultra Wide Band) est fondée sur l'émission de trains d'impulsions courtes à très large bande. Elle permet de mesurer le temps de parcours pour des applications de radar ou d'imagerie, d'estimer la localisation avec une grande précision ou de transmettre des données. L'ULB a été définie par Taylor et la FCC (Federal Communications Commission).

- Selon Taylor [Tayl06] :

L'ULB a été défini par Taylor comme tout système qui émet et reçoit des ondes dont la largeur de bande relative LB_r est supérieure ou égale à 25% de la fréquence centrales f_c . La largeur de bande est donnée par la relation suivante :

$$LB_r = \frac{f_h - f_l}{f_c} \quad \text{Eq I. 1}$$

Où f_c désigne la fréquence centrale. Son expression est donnée par :

$$f_c = \frac{f_h + f_l}{2} \quad \text{Eq I. 2}$$

f_h et f_l présentent respectivement la borne supérieure et inférieure de la bande de fréquence du signal.

- Selon la FCC [Oppe05]:

La FCC restreint l'ULB à un rapport de bande de 20 % en apportant deux précisions :

- LB_r (Largeur de bande relative) mesurée à 10 dB.
- Un signal 500 MHz de bande passante est un signal ULB.

L'ULB peut être utilisée dans les systèmes de communications sans fil à courte portée. Son emploi peut être dans deux grandes familles d'applications : "haut" et "bas" débit. Pour le bas débit (inférieur ou égal à 1 Mbit/s), des réseaux de capteurs avec plusieurs applications sont possibles. En général l'aspect localisation fait partie des services envisagés. D'un point de vue normatif on parle alors des travaux du groupe IEEE 802.15.4a.

L'autre domaine important est l'ULB haut débit. Il s'agit alors de mettre en place des systèmes de communication à courte distance (<10 m) mais avec des débits très importants. Le groupe de normalisation correspondant est le groupe IEEE 802.15.3a [Mish12].

I.6.2. Les systèmes basés sur les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network)

I.6.2.1. Wi-Fi (IEEE 802.11)

Le Wi-Fi (Wireless Fidelity) est un ensemble de protocoles de communication gérés par les normes du groupe IEEE 802.11 (Annexe 2), qui a vu le jour en 1997. C'est une technologie qui opère dans des bandes libres ne nécessitant pas d'autorisation de la part de l'organisme de réglementation. Deux bandes sont définies : Wi-Fi à 2.4 GHz et Wi-Fi à 5 GHz.

La norme IEEE 802.11 décrit les deux couches basses du modèle OSI (Annexe 1) à savoir la couche physique et la couche liaison de données.

Chaque nouvelle génération de la norme IEEE 802.11 se traduit par une augmentation du débit et de la vitesse de transmission, de la portée, de la fiabilité, et de l'optimisation de la consommation d'énergie. Les générations les plus commercialisées sont présentées dans le tableau I.1.

Les standards IEEE 802.11 sont généralement utilisés pour la transmission de données multimédia et l'accès à Internet. Cependant, ces standards n'ont pas été conçus à la base pour les applications qui nécessitent, bas débit, basse consommation d'énergie, simple communication et faible coût.

Standards IEEE	Année	Fréquence (GHz)	Largeur de bande (MHz)	Débit (Mbit/s)	Portée (m)	
					(Intérieur)	(Extérieur)
802.11	1997	2.4	22	Jusqu'à 2	20	100
802.11a	1999	5	20	Jusqu'à 54	35	120
802.11b	1999	2.4	22	Jusqu'à 11	35	140
802.11g	1999	2.4	20/40	Jusqu'à 54	38	140
802.11n	1999	2.4/5	20/40	Jusqu'à 72.2/135	70/35	250

Tableau I. 1: Comparaison des standards IEEE 802.11.

I.6.2.2. HIPERLAN (High Performance Radio LAN)

L'HIPERLAN est un standard de télécommunications européen créé par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Il définit un protocole de transmission de données à haut débit pour des communications sans fil afin de remplacer les liaisons filaires. Cette technologie opère dans la bande de fréquence de 5.15 GHz – 5.3 GHz et permet d'atteindre des débits de 23.52 Mbits/s [Berb01]. Elle se base sur la modulation GMSK pour atteindre des débits élevés. L'HIPERLAN est dédié aux connexions ad-hoc. Deux types de ce standard sont définis : l'HIPERLAN 1 et l'HIPERLAN 2. Une comparaison de ces deux types est présentée dans le tableau I.2.

	HIPERLAN 1	HIPERLAN 2
Fréquence	5.15-5.3 GHz	5.15-5.35 GHz ou 5.47-5.725 GHz
Débit maximal	Jusqu'à 23.52 Mbits/s	Jusqu'à 54 Mbits/s
Modulation	GMSK	OFDM

Tableau I. 2: Caractéristiques des normes HYIPERLAN 1 et HIPERLAN 2.

I.6.3. Les systèmes basés sur les réseaux WMAN (Wireless Metropolitan Area network)

Le réseau métropolitain sans fil est fondé sur la norme IEEE 802.16 (Annexe 2). La technologie métropolitaine la plus connue est le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Cette technologie transmet des données numériques sur une bande haute fréquence comprise entre 2 et 11 GHz. Le WiMAX supporte un débit théorique de 75 Mbits/s sur des distances allant jusqu'à 50 km.

La norme IEEE 802.16 correspond aux couches physique et liaison de données du modèle de référence OSI. Elle suit d'autres normes dans la famille IEEE 802 tel que 802.11 et 802.15. En effet, cette norme définit ainsi plusieurs spécifications de couche physique (PHY) qui peuvent être utilisées, et qui sont toutes prises en charge par la même couche de contrôle d'accès moyen (MAC). Cette flexibilité est importante car elle permet d'utiliser une mise en œuvre MAC commune par les fabricants, en fournissant un support pour chacune des spécifications PHY possibles sans avoir à redévelopper le MAC.

Deux catégories sont définies dans les révisions du standard IEEE 802.16 [Zhan11] :

- Le WiMAX fixe (IEEE 802.16-2004) est prévu pour un usage fixe, qui opère dans les bandes de fréquences 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire.
- Le WiMAX mobile (IEEE 802.16e), est prévu pour connecter des clients mobiles au réseau internet, en offrant un débit élevé permettant un accès large à des services mobiles haut débit, dans la bande de fréquences de 2 à 6 GHz.

Le WiMAX est envisagé pour fournir un support de mobilité complet dans un réseau multicellulaire. La norme IEEE 802.16m définit une version du WiMaX dédiée aux véhicules à grande vitesse (jusqu'à 350 ou même 500 km / h) [Xiao11].

I.6.4. Les systèmes basés sur les réseaux WWAN (Wireless Wide Area Network)

Le réseau étendu sans fil est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Ces réseaux sont dédiés à interconnecter des sites et des réseaux à l'échelle d'une ville ou d'un pays ou d'une planète entière. Les infrastructures physiques peuvent être terrestre ou spatiales à l'aide de satellites de télécommunications.

1.6.4.1. GSM (Global System for mobile Communication)

Le réseau GSM est un réseau mobile numérique qui se décompose en trois sous-systèmes [Germ14] :

- Le sous-système radio BSS (Base Station Sub-System) : Il s'occupe de la partie radio des communications
- Le sous-système réseau NSS (Network Switching Sub-System) : Il gère les appels, la mobilité et l'acheminement de/vers les réseaux filaires
- Le sous-système exploitation OSS (Operation Support Sub-System) : Il contrôle les droits d'accès au réseau, les droits des usagers et assure l'interface homme-machine d'exploitation.

L'architecture du réseau GSM est présentée dans la figure I.7. Les composants non définis dans ce paragraphe (Bases de donnée HLR et VLR, commutateur MSC), sont détaillées dans [Germ14].

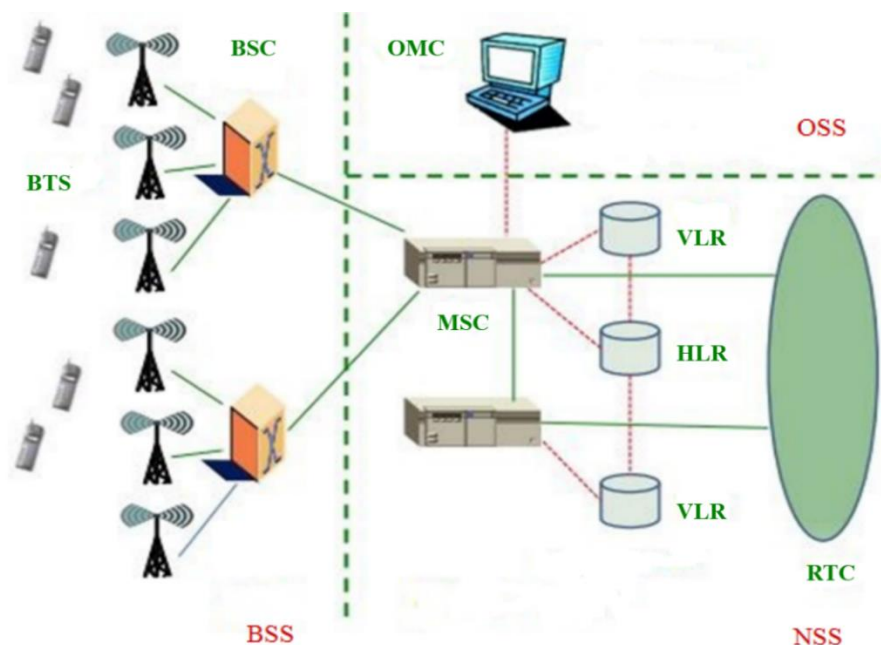


Figure I. 7: Architecture du réseau GSM [Germ14]

En Europe, Le GSM utilise les bandes de fréquence suivantes :

- La bande 900 MHz :
 - 880 MHz – 915 MHz : pour l'émission (uplink)

- 925 MHz – 960 MHz : pour la réception (downlink)
- La bande 1800 MHz :
 - 1 710 MHz – 1 785 MHz : pour l'émission (uplink)
 - 1 805 MHz – 1 880 MHz : pour la réception (downlink)

Le GPRS est vu comme un nouveau service GSM permettant un accès optimisé à Internet. Le protocole EDGE a été proposé par la suite. Il permet d'augmenter le débit atteint par le GSM (14.4 kbits/s), et par le GPRS (22.8 kbits/s). En effet, la limite de ces débits est fixée par le type de modulation utilisée : GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). La technologie EDGE adopte également la modulation 8-PSK. Cela permet d'augmenter le nombre d'états et donc le débit aussi.

1.6.4.2. GSM-R (GSM for Railway)

Le GSM-R est un système de communication dédié au ferroviaire. Il a été développé pour assurer le transfert des données comme les informations de signalisation et de la voix entre un train et les points de contrôle et de gestion. Cette solution émerge de GSM, avec des spécificités particulières au domaine ferroviaire.

Le GSM-R est composé d'une infrastructure comprenant des stations de bases installées tout au long de la voie ferrée et des contrôleurs de stations de base (BSC). La partie mobile est installée à bord du train et composée d'un récepteur connecté à une antenne GSM-R fixé sur le toit du train [Kous16].

En Europe, Le GSM-R utilise les bandes de fréquence suivantes :

- Pour l'émission (uplink) : 876 MHz – 880 MHz.
- Pour la réception (downlink) : 921 MHz – 925 MHz.

I.7. Technologie choisie

Identifier la technologie la plus prometteuse pour assurer une communication sans fil dans le ferroviaire a été le premier défi de cette thèse. En effet, les contraintes de l'environnement ferroviaire et de l'embarqué telles que :

- la mise en place dans un environnement électromagnétique sévère et riche en perturbations
- la faible consommation d'énergie des systèmes de transmission à utiliser (durée de vie importante)
- la facilité de la mise en place de l'installation et la configuration

sont des paramètres à prendre en considération. Les informations échangées sont des données associées au wagons comme l'identifiant, le poids, la matière transportée, la température, l'humidité et le trajet à parcourir, et donc une technologie à bas débit peut

répondre à notre besoin. La particularité de l'environnement ferroviaire, nous oriente vers une solution à haute fréquence. En effet, les perturbations générées par le matériel roulant ainsi que l'infrastructure sont autour de quelques kHz à quelques MHz, avec la possibilité d'atteindre 1 GHz, comme par exemple dans le cas d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe [Slim09]. La distance entre les wagons ne dépasse pas 2 m dans le cas où les deux objets communicants sont positionnés entre deux wagons et ne dépasse pas 22 m s'ils sont placés au milieu du toit de chaque wagon.

Les technologies sans fil à courte portée deviennent de plus en plus matures, offrant ainsi, un multiple choix. Le tableau suivant (tableau I.3) résume les caractéristiques des technologies les plus prometteuses pour l'application envisagée.

	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi	ULB
Standard IEEE	802.15.1	802.15.4	802.11	802.15.3a
Bande de fréquence	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz / 5 GHz	3.1-10.6 GHz
Largeur de bande	1 MHz	2 MHz	22 MHz	500 MHz / 7.5 GHz
Débit	1 Mbits/s	250 Kbits/s	54 Mbits/s	250 Kbits/s
Portée	10 m	10-100 m	100 m	10 m
Puissance	0-10 dBm	(-25)- 0 dBm	15 – 20 dBm	-41.3 dBm/MHz
Nombre de canaux	79	16	14 (pour 2.4 GHz)	1-15
Modulation	GFSK	O-QPSK	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, M-QAM	BPSK, O-QPSK
Mécanisme de coexistence	Saut de fréquence adaptatif	Sélection dynamique de fréquence	Sélection dynamique de fréquence selon la puissance	Saut de fréquence adaptatif
Nombre max des nœuds	8	65 k	2007	8

Tableau I. 3: Caractéristiques des technologies sans fil.

En comparant les technologies présentées dans ce chapitre, notre étude s'oriente vers la technologie ZigBee qui répond aux exigences de l'application.

Les avantages d'un système basé sur la technologie ZigBee sont multiples. Ce réseau est conçu pour assurer la communication entre différents terminaux et il est idéal pour l'Internet des objets étant donné qu'il consomme peu. En effet, un dispositif ZigBee passe une grande partie de son temps en dormance (mode veille). Ainsi, une seule batterie lui permet de fonctionner pendant de nombreuses années. Les modules ZigBee ont également pour avantage la possibilité de démarrer en peu de temps : lors de leur mise en marche, le premier paquet est récupérable après 15ms, contre 3s dans le cas du Bluetooth. Ces dispositifs de communication nécessitent peu de bande passante. En topologie maillée ZigBee fournit un réseau facile à installer, fiable et auto-configurable. En outre, ZigBee peut coexister avec les technologies de la bande ISM, étant donné qu'il choisit le canal le plus silencieux pour fonctionner et peut même changer de canal dans certaines conditions. L'inconvénient majeur de cette technologie est son faible débit (250 Kbits/s). Compte tenu de l'application envisagée, visant à assurer la communication entre wagons (ou ponctuellement entre wagon et infrastructure), l'échange d'informations liées au suivi de l'état des wagons, de leur contenu et de l'inutilité d'une transmission temps réel, le faible débit du ZigBee ne présente pas une contrainte dans le contexte de notre étude.

I.8. Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre était de présenter un état de l'art sur les systèmes de communication existants ou susceptibles d'exister dans le milieu ferroviaire. Ensuite, une étude comparative des différentes technologies de communication sans fil utilisées, a été réalisée. Cette étude a permis d'identifier la technologie prometteuse pour un système de communication qui vise à assurer la communication entre wagons et transmettre les informations associées vers un point central, locomotive ou station. La technologie ZigBee est la mieux adaptée au contexte de l'application envisagée, grâce à ses performances de transmission à courte portée et à bas coût avec une consommation énergétique minimale.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la propagation du signal ZigBee dans l'environnement ferroviaire. En général pour l'application d'un WSN à bord d'un véhicule de toute nature, et en particulier sur le wagon de fret, la présence du métal et des perturbations électromagnétiques générées par le matériel roulant et l'infrastructure influence le rayonnement et la fiabilité de la communication.

Chapitre II :

Etude du canal de propagation : Wagon- Infrastructure (W-I) et Wagon-Wagon (W-W)

II.1.	CONCEPTS FONDAMENTAUX DE PROPAGATION.....	45
II.1.1	DEFINITION DU CANAL DE PROPAGATION	45
II.1.2	PROPAGATION EN ESPACE LIBRE.....	47
II.1.3	PROPAGATION EN ENVIRONNEMENT REEL	47
II.1.3.1	<i>Phénomènes physiques intervenants dans la propagation d'une onde</i>	47
II.1.3.2	<i>Propagation par trajets multiples</i>	49
II.1.4	EFFET DU DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	50
II.1.4.1	<i>Antenne monopôle</i>	50
II.1.4.2	<i>Antenne omnidirectionnelle biconique</i>	51
II.1.4.3	<i>Antenne cornet double-ridge: Horn</i>	52
II.1.4.4	<i>Antenne Patch</i>	53
II.2.	MODELES DE CANAL EXISTANTS : EN OUTDOOR.....	54
II.2.1	MODELE DE CHUANG.....	55
II.2.2	MODELE A DEUX RAYONS	55
II.2.3	MODELE DE PAINTER.....	56
II.3.	ENVIRONNEMENT FERROVIAIRE ET SES EXIGENCES	57
II.3.1	TYPES DE VEHICULES DE FRET	57
II.3.2	POSITIONNEMENT DES MODULES COMMUNICANTS	60
II.3.2.1	<i>Communication Wagon-Infrastructure</i>	60
II.3.2.2	<i>Communication Wagon-Wagon</i>	63
II.4.	CONTRAINTES ET PERTURBATIONS.....	64
II.4.1.	EFFET DOPPLER.....	65
II.4.2.	CONDITIONS CLIMATIQUES	65
II.4.3.	POUSSIERES	65
II.5.	CONCLUSION	65

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de la transmission des données par onde radio. Il présente également les caractéristiques de l'environnement de propagation, leurs effets sur la communication et la fiabilité de l'échange d'informations. Quelques modèles de caractérisation du canal en « Outdoor » et à courte distance existant dans la littérature sont présentés. Par la suite, les scénarios possibles du positionnement des modules ZigBee sont étudiés, afin de proposer la configuration la plus optimale pour assurer la communication entre véhicules ferroviaires (Wagon-Wagon) et entre véhicules et infrastructure (Wagon-Infrastructure).

II.1. Concepts fondamentaux de propagation

II.1.1 Définition du canal de propagation

Le canal de propagation correspond à l'environnement traversé par les ondes électromagnétiques lors d'une transmission d'information entre un émetteur et un récepteur. En d'autres termes, c'est le système qui permet d'obtenir un signal $r(t)$ reçu par l'antenne de réception, à partir d'un signal d'entrée $e(t)$ envoyé par l'antenne d'émission. Il tient compte des effets de l'environnement et des interactions entre les ondes électromagnétiques qui peuvent se produire lors du trajet. Il convient donc de faire la distinction entre le canal de propagation qui présente les transformations de l'onde se propageant entre un émetteur et un récepteur et le canal de transmission qui prend en considération les caractéristiques des antennes comme le diagramme de rayonnement et le gain (voir figure II.1).

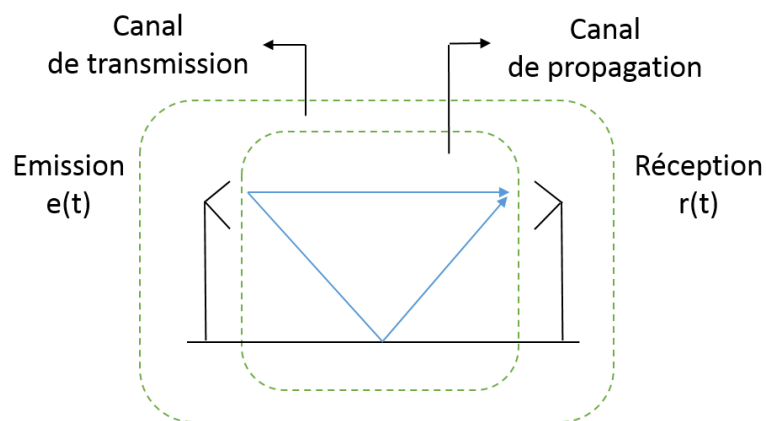


Figure II. 1: Présentation des canaux de propagation et de transmission

Pour modéliser le canal de propagation, plusieurs voies peuvent être suivies et elles sont complémentaires : les mesures, la modélisation déterministe et la modélisation statistique. Les mesures permettent d'étudier la faisabilité de la solution dans un environnement réel et de comparer les résultats aux modèles théoriques et aux simulations pour les valider. C'est une étape nécessaire pour maîtriser les perturbations dues à l'environnement que l'on peut parfois négliger dans l'étude théorique. La modélisation déterministe peut être une solution dans le cas où on maîtrise parfaitement l'environnement de propagation, ce qui n'est pas toujours le cas. La modélisation

statistique se base sur des mesures et/ou des simulations en fixant les paramètres pour un type d'environnement défini [Brun06].

Dans le cas de cette thèse, les communications sans fil entre véhicules ferroviaires et entre wagons et infrastructure sont étudiées. Ce travail repose sur des mesures et des analyses par une méthode déterministe. Pour cela, différents modèles proposés dans la littérature pour un canal « Outdoor » à courte distance, sont considérés. Par la suite, les perturbations présentes dans l'environnement sont identifiées afin de caractériser le canal de propagation.

La propagation des ondes radio subit une multitude de phénomènes dus à la présence de différents types d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. L'onde suit plusieurs chemins, induisant ainsi des temps d'arrivée différents. L'effet de ces phénomènes dépend de la fréquence et de la nature des obstacles rencontrés.

L'environnement physique engendre deux types d'atténuations dans le canal. Le premier type est l'évanouissement lent, appelé « Slow Fading ». Il caractérise les variations de la puissance sur de longues distances par rapport à la longueur d'onde λ , dues aux effets de masques (immeubles, terrain, ...). Le second type est l'évanouissement rapide, appelé « Fast Fading » qui caractérise les fluctuations de la puissance du signal sur de courtes distances par rapport à λ . Ces variations sont présentées sur la figure II. 2.

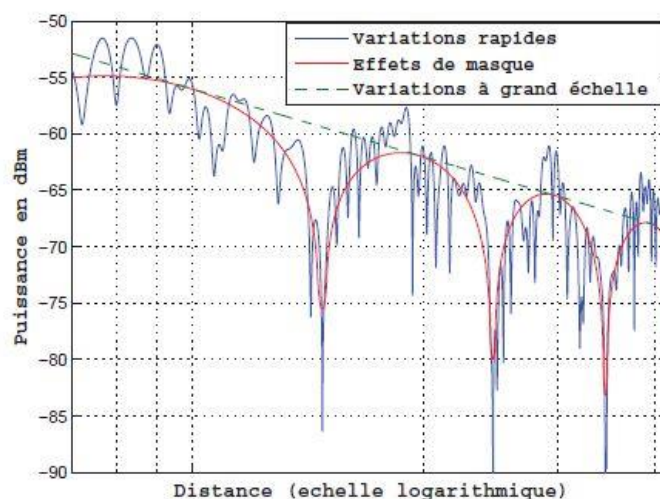


Figure II. 2: Les variations de la puissance reçue en fonction de la distance [Dess11].

Les variations à grande échelle (path loss) représentent l'affaiblissement dû à la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Plusieurs modèles de propagation ont été définis et normalisés pour modéliser le canal en indoor. Une partie de ces modèles sont adaptés aux propagations en « outdoor ». Il

existe d'autres modèles spécifiques pour la propagation en outdoor mais qui restent peu nombreux.

II.1.2 Propagation en espace libre

Considérons le cas idéal où le système de transmission est situé dans un espace libre, un espace parfait exempt de tout obstacle. Dans ce cas les antennes d'émission et de réception sont en visibilité directe (LOS : Line Of Sight). La loi de Friis, définit la puissance P_r reçue par une antenne de réception séparée d'une distance d de l'antenne de l'émission, en fonction de la puissance d'émission P_e par l'équation (eq II.1).

$$P_r = \frac{P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad \text{eq II.1}$$

Où $\lambda = \frac{c}{f}$ avec c la célérité de la lumière ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$) et f la fréquence du signal, G_e et G_r sont respectivement les gains des antennes à l'émission et à la réception, d la distance entre les deux antennes et λ la longueur d'onde sont exprimés en m.

L'atténuation est donnée par le rapport entre la puissance du signal émis P_e et celle du signal reçu P_r , elle s'écrit :

$$A = \frac{P_e}{P_r} = \frac{1}{G_e \cdot G_r} \cdot \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} \quad \text{eq II.2}$$

Dans le cas où les antennes sont isotropes ($G_e = G_r = 0 \text{ dBi}$), le modèle de propagation en espace libre en échelle logarithmique s'écrit :

$$PL = P_e - P_r = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log(d) \quad \text{eq II.3}$$

PL (Path Loss) représente l'atténuation exprimé en (dB) et P_e et P_r sont les puissances exprimées en dBm.

II.1.3 Propagation en environnement réel

II.1.3.1 Phénomènes physiques intervenants dans la propagation d'une onde

Les phénomènes physiques générés dans l'environnement de propagation dépendent de la nature des obstacles, de leurs formes ainsi que de leurs tailles (rapportées à la longueur d'onde λ). Ces phénomènes sont : la réflexion, la transmission, la diffraction et la diffusion.

La réflexion et la transmission interviennent pour des obstacles de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. Si l'obstacle est un conducteur parfait, l'onde incidente est totalement réfléchi sur la surface, sinon une partie de l'énergie va être transmise dans la surface (figure II. 3). Dans le cas où la surface est totalement lisse ou que les

irrégularités présentes sont de dimensions négligeables par rapport à la longueur d'onde, la direction et l'amplitude du rayon suit les lois de Snell-Descartes et de Fresnel.

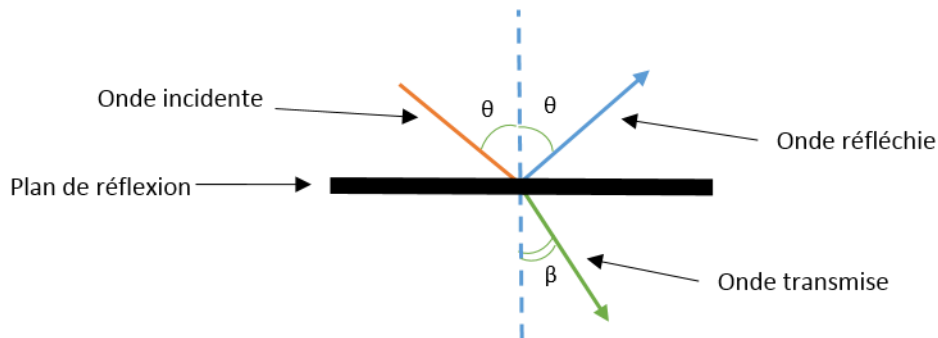


Figure II. 3: Principe de la réflexion et de la transmission.

La diffraction se produit sur l'arête d'obstacle de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde ou de même ordre de grandeur. Le principe de Huygens annonce que chaque arête de l'obstacle peut s'apparenter à une source repropageant l'onde sous forme sphérique comme présenté sur la figure II.4. Généralement, l'énergie diffractée est de plus en plus faible, au fur et à mesure que l'on s'approche de l'obstacle [Mari92].

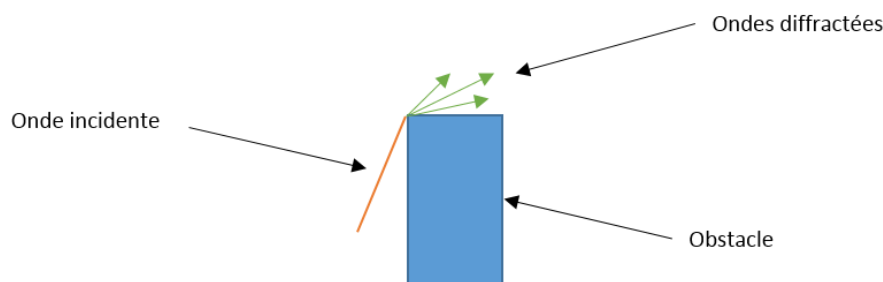


Figure II. 4: Principe de la diffraction.

La diffusion intervient lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un groupe dense d'obstacles dont les dimensions sont petites par rapport à la longueur d'onde (paroi rugueuse par exemple). Le phénomène observé correspond à la superposition d'un grand nombre de diffractions aléatoires. Généralement, l'onde est redirigée dans toutes les directions avec une atténuation variable (figure II.5).

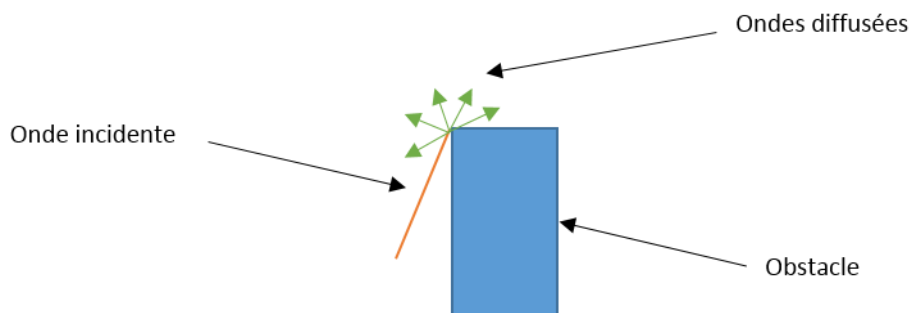


Figure II. 5: Principe de la diffusion.

II.1.3.2 Propagation par trajets multiples

Dans un environnement réel, plusieurs trajets indirects sont présents entre l'émetteur et le récepteur. Ces trajets sont dus aux réflexions sur les objets positionnés dans l'environnement de propagation, auxquels s'ajoute le trajet direct. Le signal reçu correspond à une recombinaison de ces ondes, qui ont subi un affaiblissement et des rotations de phase différentes. Le signal reçu est donc la résultante de plusieurs composantes caractérisées par des amplitudes, des angles et des directions d'arrivées différentes comme représenté sur la figure ci-dessous.

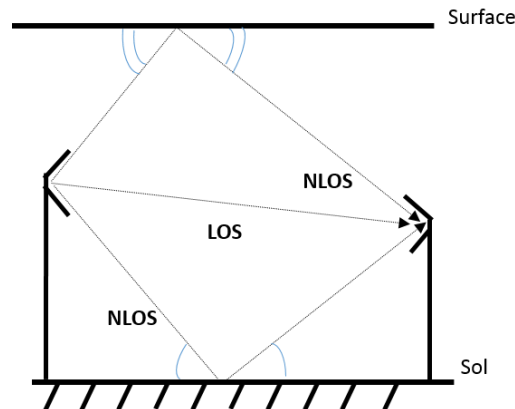


Figure II. 6: Propagation par trajets multiples.

L'expression du signal reçu s'écrit donc sous la forme générale d'une somme de N signaux (eq II.4).

$$r(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \tau_n} e(t - \tau_n) \quad \text{eq II.4}$$

Où A_n est l'amplitude du signal et τ_n le retard du $n^{\text{ième}}$ trajet et N le nombre total de trajets considérés, f_0 est la fréquence et $e(t)$ est le signal envoyé.

On en déduit alors la forme de la réponse impulsionnelle du canal physique :

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \tau_n} \delta(t - \tau_n) \quad \text{eq II.5}$$

Dans le cas où des objets sont présents entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice, un trajet en visibilité direct (LOS) peut ne pas être disponible. Dans ce cas, ce sont les trajets en visibilité non directe (NLOS : Non Line Of Sight) qui permettront de recevoir l'information envoyée.

II.1.4 Effet du diagramme de rayonnement

Une antenne permet de convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée dans toutes les directions de l'espace (et inversement pour une antenne en réception). Ces directions sont définies par le diagramme de rayonnement. Ce diagramme définit la variation des champs ou de la densité de puissance en coordonnées tridimensionnelles.

Dans le cas particulier d'une antenne isotrope sans perte et d'une propagation dans un milieu homogène et isotrope, l'antenne rayonne de manière identique dans toutes les directions de l'espace formant ainsi une onde sphérique.

Dans le cas général, les antennes émettent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale [Boye11].

Dans cette thèse quatre antennes disponibles au laboratoire seront étudiées : un monopôle, une antenne biconique, une antenne Horn (appelée aussi cornet double-ridge) et une antenne plaquée 4-patches accordée à 2.45 GHz.

Les diagrammes de rayonnement de ces antennes sont présentés dans l'annexe 5.

II.1.4.1 Antenne monopôle

L'antenne monopôle (figure II.7) est constituée d'un élément de longueur égale au quart de longueur d'onde, perpendiculaire à un plan conducteur.



Figure II. 7: Antenne monopôle de type PSKN3-24/55 RS.

Les antennes monopôle commercialisées en général avec les modules ZigBee sont de la série PSKN3 [Pskn1]. Une caractéristique d'articulation permet de régler l'antenne entre une position droite et une position 90°. Ceci est utile pour les produits qui doivent être à la fois horizontaux et verticaux, ou lorsque le connecteur est placé sur le côté d'un périphérique radio. Plus de détails sur ce type d'antennes sont présentés dans [Pskn1] et dans [Pskn2]. Le paramètre S_{11} de cette antenne est présenté dans la figure II.8

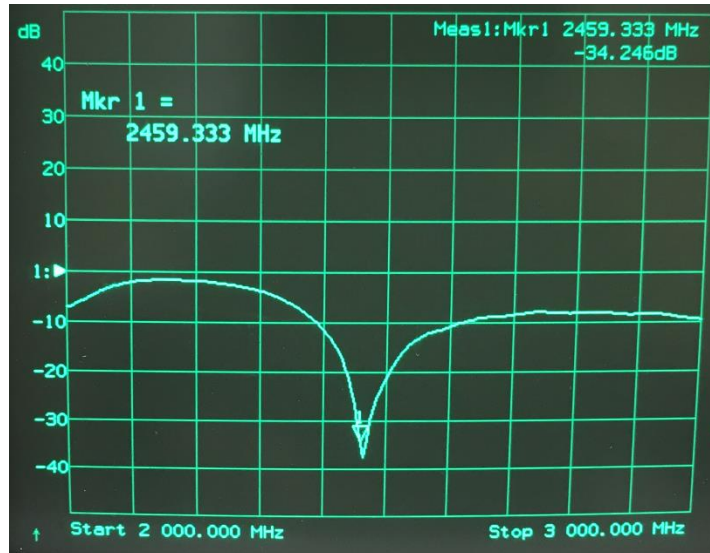


Figure II. 8: Paramètre S_{11} de l'antenne PSKN3-24/55 RS

II.1.4.2 Antenne omnidirectionnelle biconique

Une antenne biconique présentée dans la figure II.9, est une antenne à large bande avec un diagramme de rayonnement omnidirectionnel dans le plan H similaire à une antenne dipôle.



Figure II. 9: L'antenne biconique omnidirectionnelle de type RS0460.

L'antenne biconique s'utilise dans le cas d'applications exigeant un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et une large bande passante. Le paramètre S_{11} de cette antenne est présenté dans la figure II.10. Les caractéristiques de cette antenne sont présentées dans [Bico60].

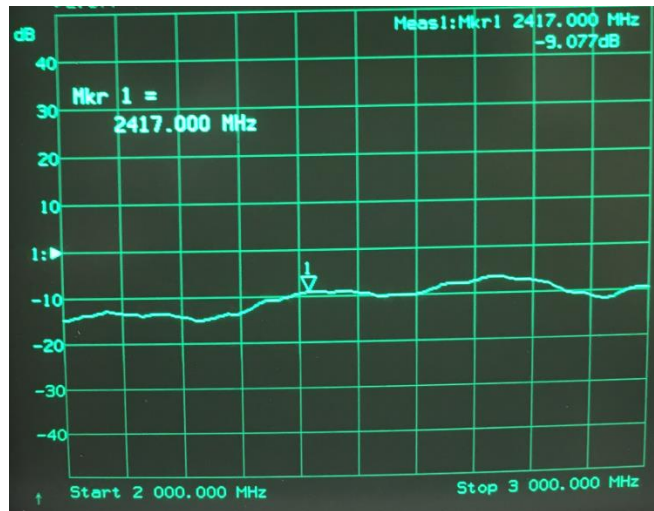


Figure II. 10: Paramètre S_{11} de l'antenne de type RS0460

II.1.4.3 Antenne cornet double-ridge: Horn

L'antenne Horn (figure II.11) est un guide d'onde à section progressivement croissante et se termine par une ouverture rayonnante. L'objectif de cette variation est d'adapter l'impédance du milieu guidé à celle de l'espace libre [Darr15]. L'antenne Horn possède une couverture exponentielle afin de fournir une large bande passante. Plus de détails sur ce type d'antennes sont présentés dans [Horn71].



Figure II. 11: Présentation d'une antenne Horn SAS-571.

Le paramètre S_{11} de l'antenne Horn est représenté dans la figure II.12.

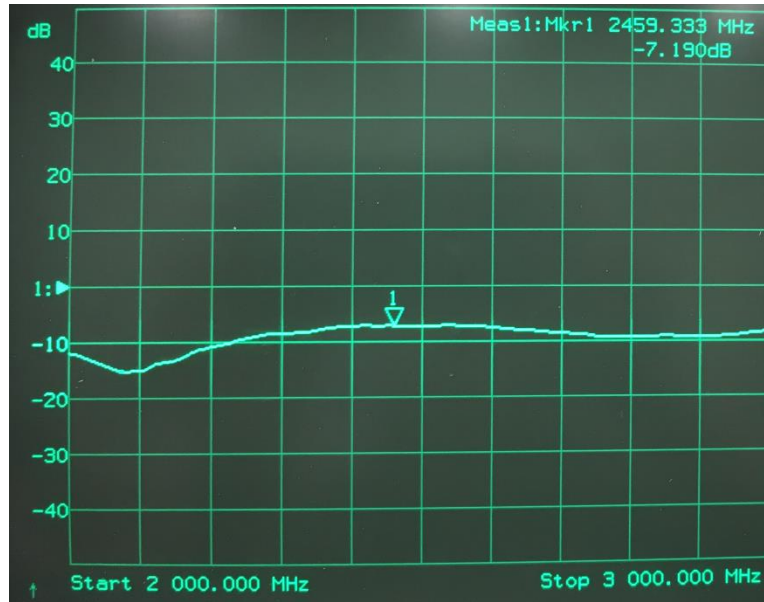


Figure II. 12: Paramètre S_{11} de l'antenne Horn SAS-571.

II.1.4.4 Antenne Patch

Les antennes « patches » sont généralement réalisées par gravure d'un circuit imprimé (exemple présenté dans la figure II.13), et utilisées pour des fréquences élevées. Ces antennes deviennent de plus en plus répandues grâce à la grande variété de formes géométriques qu'elles offrent et qui les rendent pratiques et flexibles d'intégration dans un système communicant. Le principal avantage de ce type d'antenne réside dans leur faible coût de fabrication. Ces antennes sont résonantes sur une bande assez étroite.

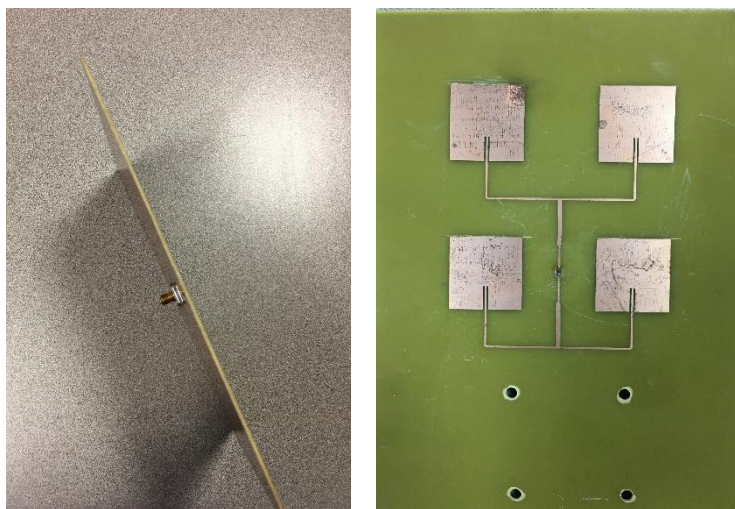


Figure II. 13: Antenne 4-Patchs adaptée à 2.45 GHz

Le paramètre S_{11} de cette antenne est présenté dans la figure II.14.

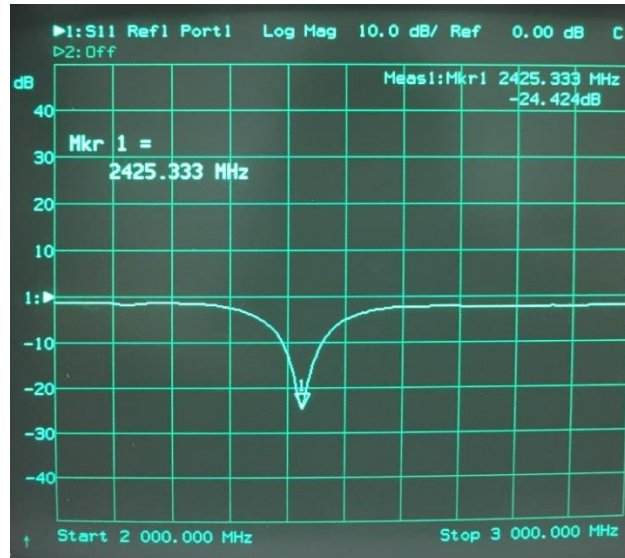


Figure II. 14: Paramètre S_{11} de l'antenne 4-Patches à 2.45 GHz

Les caractéristiques de ces différentes antennes utilisées sont comparées et résumées dans le tableau suivant (Tableau II.1).

Types d'antennes	Avantages	Inconvénients
Monopôle	Petite taille, rayonnement omnidirectionnel dans le plan H	Peu de gain, faible bande passante, rayonnement dans le demi plan
Biconique	Rayonnement omnidirectionnel dans le plan H, large bande passante	Taille importante, manque de flexibilité, peu de gain.
Horn	Bonne adaptation, gain de 20 dBi, bande passante large, bonne qualité de polarisation linéaire	Taille importante, manque de flexibilité
Patch	Faible poids, Faible coût de fabrication, Polarisation linéaire.	Bande passante étroite, moyen gain (6 dB), rayonnement dans le demi plan.

Tableau II. 1: Comparaison des antennes étudiées.

II.2. Modèles de canal existants : en outdoor

Les modèles de propagation sont des outils mathématiques permettant la planification et l'optimisation des réseaux sans fil. Ils sont établis à partir de mesures et de calculs mathématiques et permettent la caractérisation des pertes dans un environnement spécifique. Dans ce paragraphe, différents modèles empiriques sont détaillés.

II.2.1 Modèle de Chuang

Chuang propose un modèle relativement simple pour modéliser les variations à petite échelle (fast fading) du signal dues aux trajets multiples [Chua87]. Le signal reçu est la combinaison des trajets multiples. La première hypothèse est de considérer que le canal est stationnaire au sens large. Dans ce cas, sa variation temporelle (ou spatiale) présente des caractéristiques de stationnarité faible. La deuxième hypothèse consiste à considérer que les contributions de diffuseurs élémentaires correspondant à des retards différents sont décorrelées.

La réponse impulsionnelle s'écrit sous la forme (eq II.6) :

$$h(t) = \sum_m A_m \cdot e^{j\varphi_m} \cdot \delta(t - \tau_m) \quad \text{eq II.6}$$

A_m est une variable aléatoire avec une distribution de Rayleigh. φ_m est une variable aléatoire uniformément distribuée de 0 à 2π . τ_m est le retard du $m^{\text{ième}}$ trajet. $h(t)$ est donc une variable complexe gaussienne centrée. Le signal reçu $r(t)$ s'écrit (eq II.7):

$$r(t) = e(t) * h(t) + n(t) \quad \text{eq II.7}$$

Où $e(t)$ est le signal transmis et $n(t)$ est un bruit blanc gaussien additif, un modèle basique de bruit qui prend en compte les conditions de l'environnement de propagation.

II.2.2 Modèle à deux rayons

Dans ce modèle, on suppose que deux trajets sont générés dans le canal de propagation, le trajet direct et le trajet réfléchi par le sol comme présenté dans la figure II.15. Pour déterminer ce dernier, il faut connaître la polarisation et les propriétés de la surface, la nature du canal de propagation et son indice, ainsi que le diagramme de rayonnement des antennes. Les angles d'émission θ et de réception β sont déterminés par les calculs géométriques.

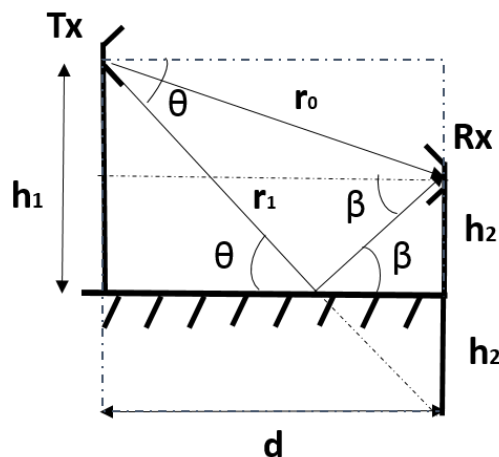


Figure II. 15: Modèle de propagation à 2 rayons

Le champ électrique résultant est la somme vectorielle des champs des deux trajets :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \text{eq II.8}$$

L'expression du champ électrique reçu, d'un seul trajet pour une antenne dont le diagramme de rayonnement s'écrit $f(\theta, \varphi)$ est présenté dans l'équation (eq II.9) :

$$E = K f(\theta, \varphi) \frac{e^{jkr}}{r} \quad \text{eq II.9}$$

L'expression de $f(\theta, \varphi)$ pour un dipôle accordé est détaillée dans l'équation ci-dessous (eq II.10).

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \quad \text{eq II.10}$$

Ce type de modèle, et aussi une version à plusieurs rayons réfléchis permet de modéliser le « slow fading ».

II.2.3 Modèle de Painter

Ce modèle de canal est un modèle mathématique proposé par Painter. Il se base sur des statistiques de l'irrégularité (figure II.16) de la surface de réflexion (sol) [Pain73].

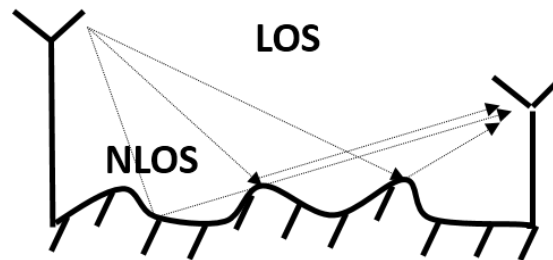


Figure II. 16: Propagation par un sol irrégulier.

Le signal envoyé $e(t)$ dans le canal en fonction du temps s'écrit selon l'équation eq II.11.

$$e(t) = m(t).e^{j.2\pi.f_0.t} \quad \text{eq II.11}$$

$m(t)$ représente les variations de la forme d'onde qui dépendent de la modulation choisie. f_0 est la fréquence du signal.

Le signal total réfléchi r_d est la somme des composantes issues des réflexions par le sol en fonction du temps. Il est donné par l'équation eq II.12.

$$r_d = \sum_n \frac{R_n}{r_n} \cdot m\left(t - \frac{r_n}{c_0/n}\right) \cdot e^{j \cdot (2\pi \cdot f_0 \cdot t - \beta \cdot r_n)} \quad \text{eq II.12}$$

Où $\beta = \frac{\omega}{c_0/n}$ est la constante de propagation, R_n le coefficient de réflexion du $n^{\text{ième}}$ trajet et r_n la distance parcourue par le $n^{\text{ième}}$ trajet.

Ce modèle permet de calculer le « slow fading ».

D'autres modèles sont proposés dans la littérature pour une propagation à l'extérieur. Ils sont présentés et comparés avec ceux présentés auparavant dans le tableau II.2. Ces modèles sont adaptés à une propagation à grandes distances, à la présence d'obstacles de grande tailles. Ces modèles sont présentés dans [Chua87], [Sing12], [Hata80], [WaBe88], [Ikeg91] et [Cost99].

Modèles de canaux	Fréquence	Description
Chuang	-	Statistique
Painter	-	Mathématique
Young	150 à 3700 MHz	Empirique (New York)
Okumura	150–1920 MHz	Empirique (Tokyo)
Hata	150 à 1500 MHz	Mathématique décrivant Okumura
Okumura-Hata (ECC)	Jusqu'à 3 GHz	Basé sur Okumura
Cost 231-Hata	500-2000 MHz	Extension de Hata
Cost 231 W-I	700-3500 MHz	Combinaison de Walfisch et Ikegami

Tableau II. 2: Résumé de modèles de canal proposés dans la littérature.

II.3. Environnement ferroviaire et ses exigences

II.3.1 Types de véhicules de fret

Contrairement aux véhicules ferroviaires de passagers, les formes des véhicules ferroviaires utilisés dans le transport de marchandises sont nombreuses. Ces formes sont choisies selon la nature de la marchandise et les conditions de transport exigées. Nous présentons dans ce paragraphe les différents types de véhicules ferroviaires existants. Ensuite nous allons étudier les scénarios possibles du positionnement des dispositifs de transmission (ZigBee) et choisir celui qui s'adapte à chaque type de véhicules.

On peut classer les wagons de fret en plusieurs catégories [Olog10] :

- Wagon tombereau : il est présenté dans la figure II.17. Il est sans toit fixe, il comporte des hausses (parois verticales) fixes ayant une hauteur de plus de 60 cm. Il est utilisé pour le transport de minerais ou vrac solide.



Figure II. 17 : Wagon tombereau de la SNCF [refw1]

- Wagon couvert: dans cette catégorie de wagons (présenté dans la figure II.18) nous trouvons trois types de wagon
 - Wagon isotherme : la caisse est construite avec des parois isolantes permettant de limiter les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur de la caisse.
 - Wagon réfrigérant : il dispose d'une source de froid. Ce type permet d'abaisser la température à l'intérieur de la caisse et la maintenir.
 - Wagon calorifique : il dispose d'une source de chaleur. Ce type permet d'élever la température à l'intérieur de la caisse et de la maintenir.



Figure II. 18: Wagon couvert de la SNCF [refw2]

- Wagon plat : il est sans toit et sans bord latéral ou avec des hausses de 60 cm. Ces wagons sont conçus pour le transport de conteneurs et de caisses mobiles (figure II.19).



Figure II. 19: Wagon plat de la SNCF [refw2].

- Wagon à parois de bout ou wagon porte-conteneurs : c'est un wagon plat avec des parois en extrémités. Il est conçu pour le transport intermodal (figure II.20).



Figure II. 20: Wagon à parois de la SNCF [refw3].

- Wagon citerne : il est conçu pour le transport en vrac de liquides ou de gaz (figure II.21).



Figure II. 21: Wagon citerne de la SNCF [refw3].

- Wagon Trémies : il est conçu pour le transport de produits pulvérulents tels que ciment et farine (figure II.22).



Figure II. 22: Wagons trémies [refw5].

Le tableau suivant résume ces types de wagons et leurs caractéristiques.

Types		Marchandises	Caractéristiques
Wagon tombereau		Minéraux / Vrac solide	Sans toit fixe
Wagon couvert	Isotherme	Périssables	Parois isolant
	Réfrigérant	Périssables	Source de froid
	Calorifique	Périssables	Source de chaleur
Wagon plat		Conteneurs mobiles / Tuyaux	Plat sans bord / hausses
Wagon à paroi d'extrémité		Transport intermodal	Plat avec parois en extrémités.
Wagon citerne		Liquides / Gaz	citerne
Wagon Trémies		Ciment / Farine	Ouvert

Tableau II. 3: Comparaison des types de wagons.

II.3.2 Positionnement des modules communicants

II.3.2.1 Communication Wagon-Infrastructure

La communication entre wagon et infrastructure permet d'envoyer les informations pour assurer le suivi, la traçabilité et aussi la localisation des wagons isolés, ou pour envoyer les informations centralisées par le point de collecte du train (locomotive) vers l'infrastructure (logistique). Le transfert d'information peut se faire entre des bornes situées sur le bas-côté le long des rails et des antennes positionnées sur les faces latérales des wagons (figure II.23), ou bien en positionnant l'antenne fixe sur un portique et des antennes mobiles positionnées au niveau du parebrise ou sur le toit des wagons (figure II.24).

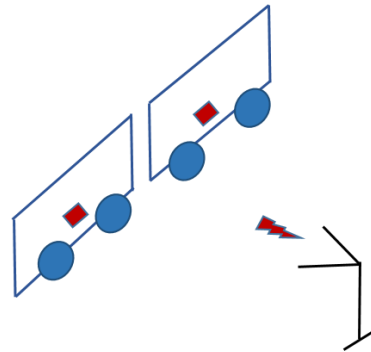


Figure II. 23: Borne installée au niveau de l'infrastructure.

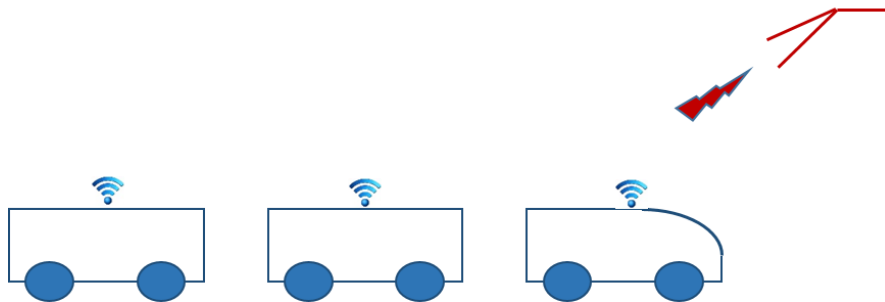


Figure II. 24: Portique installé au niveau de l'infrastructure

Dans le premier scénario, l'antenne fixe est placée sur le bas-côté des rails, à la même hauteur que l'antenne mobile positionnée sur une face latérale du wagon. Dans ce scénario, les antennes d'émission et de réception seront placées à la même hauteur et en visibilité directe, avec une distance maximale de 2m. Dans ce cas, le champ reçu (figure II. 25) est la résultante du champ issu du trajet direct et de celui réfléchi par le sol (paragraphe II.2.2).

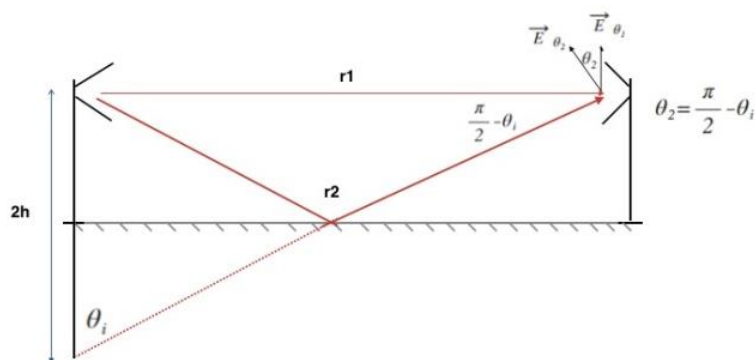


Figure II. 25: Le modèle de propagation à 2-rayons

La figure II.26 représente la puissance théorique reçue en fonction de la distance pour le modèle à 2-rayons.

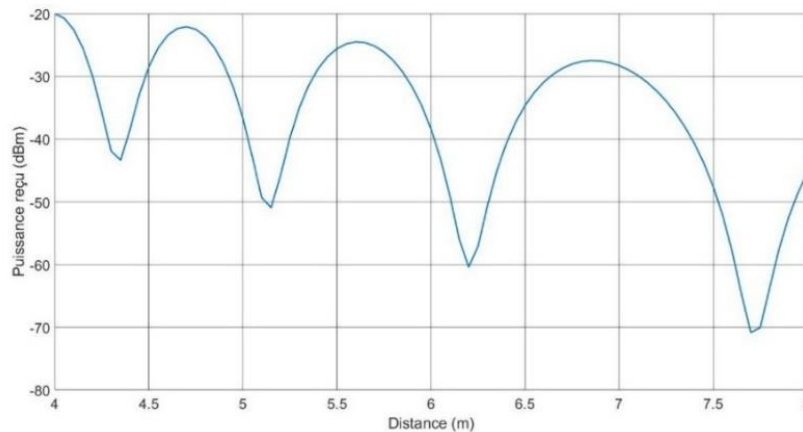


Figure II. 26: Puissance théorique reçue par l'antenne réceptrice en espace libre

Les variations du modèle à deux rayons sont bien connues. En effet, plus le récepteur s'éloigne de l'émetteur, plus l'amplitude relative des variations augmente et plus la fréquence spatiale de ces variations diminue.

Dans le deuxième scénario (figure II.27), l'antenne fixe est placée sur un portique à une hauteur fixe H . Cela garantit la visibilité directe avec l'antenne mobile placée sur le pare-brise ou le toit de la locomotive et évite l'effet de masquage possible par des personnes ou des installations au niveau de l'infrastructure.

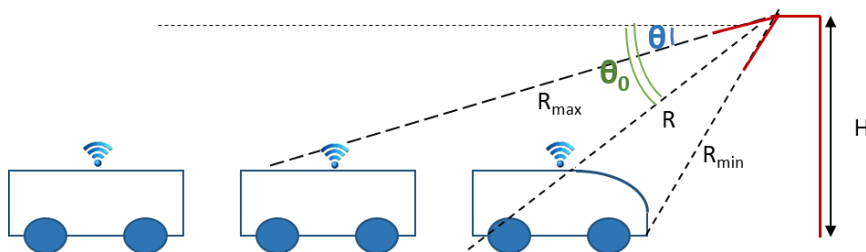


Figure II. 27: Communication entre train et infrastructure.

Comme, a priori, il y a peu de réflexions du signal émis, le bilan de liaison entre les deux antennes est donné par la formule de Friis. L'expression de la puissance reçue est :

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \quad \text{eq II.13}$$

Avec P_t la puissance transmise par le module ZigBee placé au niveau du pare-brise ou sur le toit en dBm, G_t et G_r sont les gains des antennes d'émission et de réception en dBi, λ est la longueur d'onde en m, et R est la distance entre les deux antennes en m ($R_{min} \leq R \leq R_{max}$).

Selon le calcul géométrique :

$$\sin \theta = \frac{H}{R_{max}} \quad \text{et} \quad \sin \theta_0 = \frac{H}{R} \quad \text{eq II.14}$$

Avec θ l'angle entre le plan horizontal et R_{max} et θ_0 l'angle entre le plan horizontal et R .

L'équation (eq II.15) se réécrit :

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{\lambda \sin \theta_0}{4\pi H}\right) \quad \text{eq II.15}$$

II.3.2.2 Communication Wagon-Wagon

La communication entre wagons permet de collecter des informations telles que le contenu, le poids, la température, l'humidité... et les transmettre à la locomotive. Ces informations permettent d'avoir un outil d'aide à la conduite pour le conducteur ou par l'automatisme de conduite dans le cas de train autonome (calcul de la distance de freinage par exemple), et permet aussi d'assurer le suivi de l'état des wagons durant les déplacements (intégrité du train). La communication sans fil entre deux véhicules ferroviaires dans le cas qui nous intéresse est une communication à bas débit, en « Outdoor » et à courte distance, qui peut subir différentes perturbations. Quatre architectures sont possibles pour assurer cette communication, et sont présentées dans la figure II.28.

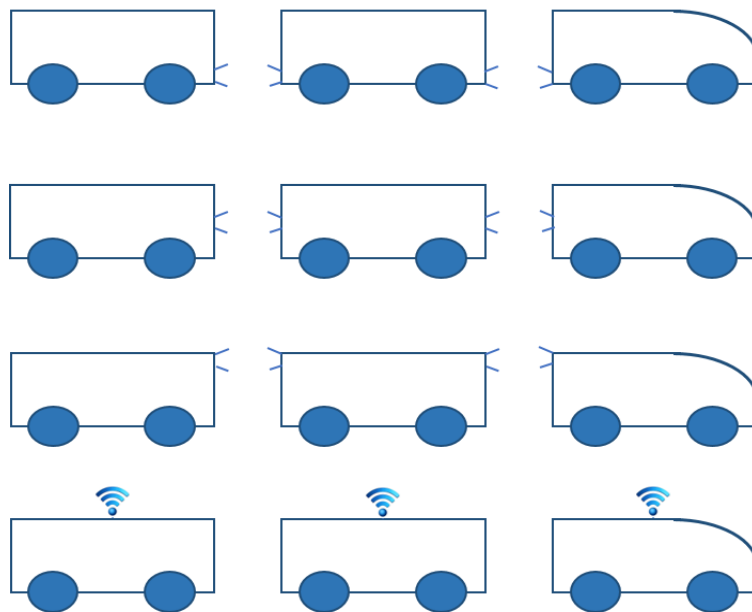


Figure II. 28: Les scénarios étudiés pour le positionnement des modules de transmission.

Dans les trois premiers scénarios, les dispositifs ZigBee sont placés entre les deux véhicules ferroviaires.

- Dans le premier, les dispositifs sont placés au bas des wagons. Cette architecture est adaptée aux wagons de type plat et à paroi d'extrémité. Des dispositifs en plus doivent être associés aux conteneurs et caisses mobiles.
- Dans le deuxième scénario, les dispositifs sont placés au milieu des surfaces opposées des wagons. Cela est possible pour les wagons de type tombereau, citerne, couvert, et trémies.
- Dans le troisième scénario, les modules ZigBee sont positionnés à la hauteur des wagons. Cela est réalisable pour tous les types du scénario précédent, sauf que dans ce cas, on s'approche davantage de la caténaire et du pantographe, ce qui rend la communication sensible aux perturbations qui peuvent être générées à ce niveau.
- Dans le quatrième scénario, les modules sont placés sur le toit des wagons. Ce scénario n'est faisable que pour les wagons citernes et subit les mêmes contraintes que le scénario précédent.

Nous constatons donc que le positionnement des dispositifs communicants dépend du type des véhicules ferroviaires. Pour trancher sur le choix le plus adapté quand plusieurs scénarios sont possibles, nous avons étudié la performance de la technologie ZigBee en mesurant et comparant la puissance reçue et les perturbations présentes dans chaque scénario. Les résultats sont présentés dans le troisième et le quatrième chapitre.

II.4. Contraintes et perturbations

Comme cité auparavant, les communications W-W et W-I sont à courte portée et à bas débit; elles peuvent donc être facilement maîtrisable. Cependant, ces communications peuvent être sensibles à différentes perturbations dues à l'environnement ferroviaire. En effet, plus les antennes sont positionnées en hauteur plus elles sont proches de la caténaire et du pantographe. En effet, un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe génère un bruit impulsif qui peut impacter directement notre système. La solution proposée peut être soumise aussi à des perturbations générées par d'autres émetteurs de signaux RF situés dans le voisinage et communicants dans la même bande de fréquence que le ZigBee, tel que le Wi-Fi (dont la puissance est plus importante comparée à celle de ZigBee). Un autre type de perturbations qui peut être présent est les perturbations intentionnelles. Ces dernières peuvent être générées pour nuire au système proposé à des fins malveillantes. Ces perturbations seront étudiées dans le chapitre IV.

Les deux communications W-W et W-I peuvent subir d'autres contraintes telles que l'effet doppler. En plus, puisque le signal devra se propager dans l'air, les conditions climatiques et la poussière peuvent perturber le système proposé.

II.4.1. Effet doppler

La vitesse du train n'impactera pas la transmission puisque les dispositifs sont associés aux wagons qui roulent à la même vitesse l'un par rapport à l'autre, dans le cas d'une communication W-W. La communication W-I, quant à elle, se fait au niveau des gares ou des voies de garage, où les wagons sont en arrêt ou roulent à des vitesses réduites. Néanmoins, les vibrations générées peuvent impacter la communication. Cela doit être pris en compte lors du positionnement et de l'orientation des antennes.

II.4.2. Conditions climatiques

Etant donné que les signaux se propagent dans l'air, la pluie, la neige peuvent perturber la propagation. Ces conditions climatiques et leurs effets ont été étudiés dans le projet DRIVE [Driv89]. Une étude de liaison sol-véhicule à courte portée de type télépéage a été réalisée. Selon les résultats de ce projet, l'atténuation à des fréquences comprises entre 1 et 10 GHz dans l'air, parfois chargé de brouillard, de pluie ou de neige est négligeable sur quelques dizaines de mètres [Bara91].

II.4.3. Poussières

La poussière est présente dans l'air, mais peut également être générée par les trains. Cette dernière est due aux phénomènes de frottement tels que le freinage, le contact roues-rails et le contact pantographe-caténaire. Des particules métalliques peuvent s'accumuler sur les dispositifs et atténuer le signal.

Afin limiter les perturbations qui peuvent être générées par le climat et les poussières, les dispositifs doivent être placés dans des radômes rigides. Ces derniers permettent de les protéger des mauvaises manipulations susceptibles de les abîmer, et également de faciliter leurs nettoyages. En effet, un nettoyage fréquent est nécessaire pour éviter la construction d'une couche métallique ou de poussières bloquant la propagation du signal.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les mécanismes de propagation électromagnétique et les modèles de canal existants pour une propagation en outdoor. Nous avons également les caractéristiques des différents types d'antennes que nous allons utiliser dans la campagne de mesures présentées au chapitre III. Ensuite, nous avons comparé plusieurs scénarios du positionnement des modules communicants afin de définir le scénario optimal qui dépend du type du véhicule ferroviaire (citerne, plat, tombereau...). En effet, les dispositifs peuvent être placés sur les surfaces des wagons de types tombereau, couvert, citerne ou trémies. Quant aux wagons plats, il est nécessaire de mettre en place des dispositifs supplémentaires sur les surfaces des conteneurs pour faciliter la gestion logistique du transport intermodal.

Enfin, nous avons énuméré les contraintes et les perturbations qui peuvent nuire au système proposé telles que l'effet doppler et les conditions climatiques.

Chapitre III :

Performances de la solution proposée dans l'environnement de propagation

III.1. STANDARD ZIGBEE.....	69
III.1.1. ARCHITECTURE.....	69
III.1.2. TOPOLOGIE	70
III.1.3. COUCHE PHY	71
III.1.4. COUCHE MAC.....	73
III.1.5. PRESENTATION DU RESEAU ZIGBEE DEPLOYE	74
III.2. ETUDE DE LA PROPAGATION WAGON-INFRASTRUCTURE	75
III.2.1. CARACTERISATION DE LA PROPAGATION A 2.4 GHZ EN ESPACE LIBRE	75
III.2.2. CARACTERISATION DE LA PROPAGATION DU SIGNAL ZIGBEE EN ESPACE LIBRE	76
III.2.3. CARACTERISATION DE LA PROPAGATION EN PRESENCE DE CONTENEURS	77
III.2.4. POSITIONNEMENT DES ANTENNES	80
III.2.5. CONCLUSION	82
III.3. ETUDE DE LA PROPAGATION WAGON-WAGON.....	83
III.3.1. CARACTERISATION DE LA PROPAGATION ENTRE VEHICULES.....	83
III.3.2. POSITIONNEMENT DES ANTENNES POUR UNE PROPAGATION ENTRE DE VEHICULES.....	84
III.3.3. POSITIONNEMENT DES ANTENNES POUR UNE PROPAGATION ENTRE CONTENEURS	86
III.3.4. CONCLUSION	87
III.4. CONCLUSION	87

Dans ce chapitre, nous présentons le standard ZigBee et sa pile protocolaire. Ensuite, nous caractérisons les modules ZigBee dans différents environnements : en espace libre et en présence de véhicules et conteneurs. Nous comparons également les scénarios possibles du positionnement des modules ZigBee, afin de proposer la configuration la plus optimale pour assurer la communication entre véhicules ferroviaire et infrastructure (Wagon-Infrastructure) et entre véhicules ferroviaires (Wagon-Wagon).

III.1. Standard ZigBee

ZigBee est une technologie qui définit un ensemble de protocoles de communication pour la mise en place de réseaux sans fil à courte portée et faible coût. ZigBee est un réseau LP-WPAN (Low Power – Wireless Personal Area Network) qui devient de plus en plus répandu dans le milieu industriel. Cette technologie offre plusieurs avantages comme la taille des dispositifs, la consommation d'énergie, la flexibilité et l'évolution d'installation. ZigBee est une technologie qui s'appuie sur le travail du groupe IEEE 802.15.4 et est défini par le groupe de professionnels ZigBee Alliance [Alli02] en 2002. ZigBee regroupe un ensemble de protocoles de haut niveau adoptant les deux couches basses (couche PHY et couche MAC) de la norme IEEE 802.15.4, comme illustré sur la figure III.1.

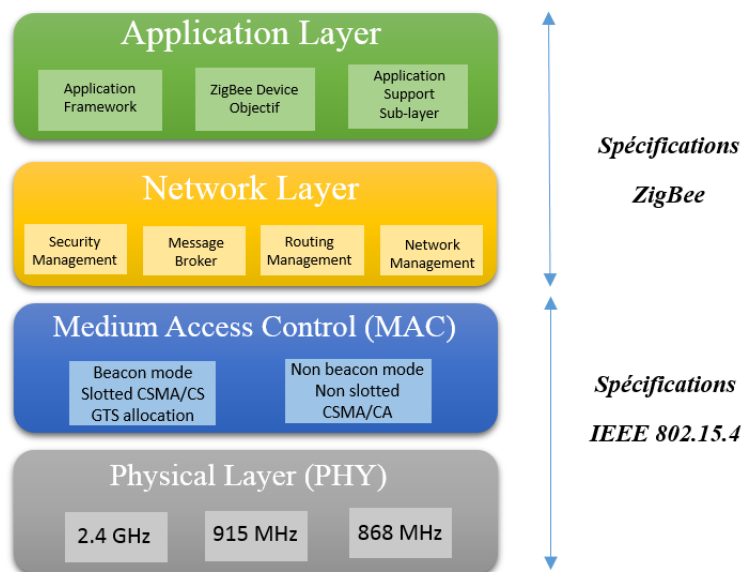


Figure III. 1: Pile de protocoles de la technologie ZigBee.

III.1.1. Architecture

Un réseau WPAN est composé de plusieurs nœuds qui collectent et transmettent l'information vers un point central qui se charge du traitement des données, ou joue un rôle de passerelle (gateway) vers un autre WPAN. Ce dernier est appelé « puits » ou « coordinateur WPAN ».

Deux types de nœuds sont définis dans la norme IEEE 802.15.4: les dispositifs à fonction réduite (RFD : Reduced Fonction Device) et les dispositifs à fonction complète (FFD : Full Fonction Device).

- Les nœuds FFD possèdent toutes les fonctions. Ils peuvent jouer le rôle de coordinateur WPAN.
- Les nœuds RFD sont des nœuds terminaux qui ont des fonctions réduites. Un RFD ne peut communiquer qu'avec un périphérique FFD. Ils sont très fréquemment en mode veille.

Les nœuds FFD et RFD peuvent jouer le rôle de :

- Coordinateur PAN : c'est le nœud qui initie et contrôle le réseau PAN. Il joue aussi le rôle d'une passerelle vers les autres réseaux et gère également les fonctions du niveau haut du réseau telles que l'authentification et la sécurité.
- Coordinateur : c'est un FFD qui gère une zone du réseau (cluster), ce qui évite de saturer le coordinateur PAN. Il se charge également de router les paquets vers le coordinateur PAN.
- Périphériques : ce sont des nœuds périphériques comme les capteurs et les actionneurs. Ils s'activent sur un changement de leur état ou pour répondre à une trame.

Ces terminologies sont définies par la norme IEEE 802.15.4. Quant à la technologie ZigBee, elle adopte une terminologie légèrement différente [Nazi12]. Ces différences sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Norme IEEE 802.15.4	Technologie ZigBee
Coordinateur PAN (FFD)	Coordinateur
Coordinateur (FFD)	Routeur
Périphérique (RFD)	Périphérique

Tableau III. 1: Les nominations des dispositifs IEEE 802.15.4 et ZigBee selon leurs fonctionnalités.

III.1.2. Topologie

La norme IEEE 802.15.4 définit différentes topologies possibles de réseaux : étoile (star), point à point (peer-to-peer) et la topologie en arbre (cluster-tree). Au-dessus des deux couches IEEE 802.15.4, la couche réseau ZigBee permet la création de réseaux maillés (mesh) avec un routage automatique. Ces topologies sont présentées dans la figure suivante.

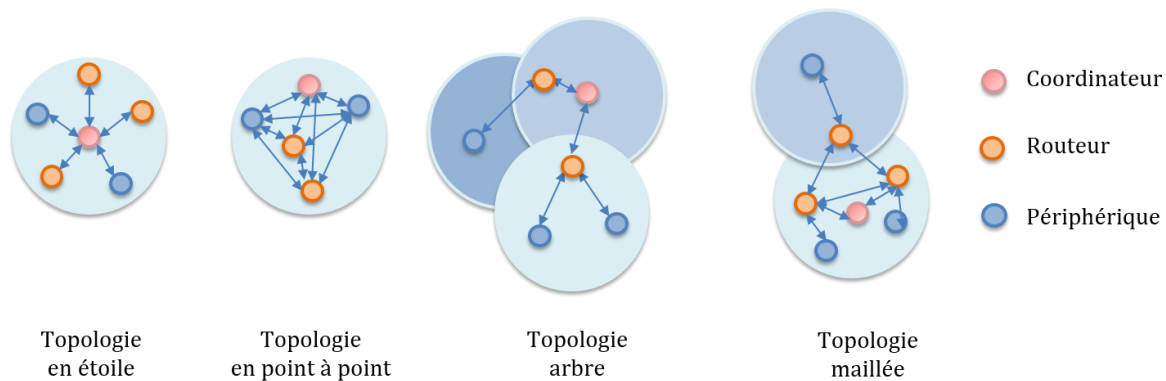


Figure III. 2: Topologies supportées par la technologie ZigBee.

Dans la topologie en étoile, le nœud coordinateur communique directement avec les nœuds se trouvant dans sa portée radio. Dans ce cas, tout le trafic du réseau passe par le coordinateur.

La topologie arbre est un cas particulier de la topologie point à point. En effet, dans une topologie point à point, chaque nœud peut communiquer avec n'importe quel nœud du réseau. Les nœuds intermédiaires (routeurs) sont sollicités afin d'assurer la transmission des paquets jusqu'à destination. En revanche, dans une topologie arbre, le réseau est hiérarchisé avec un coordinateur et des routeurs gérant les périphériques qui leur sont connectés. Toutes les communications passent par le coordinateur.

Dans une topologie maillée, les routeurs communiquent en point à point, et donc l'information peut ne pas être remontée au coordinateur pour atteindre la destination.

III.1.3. Couche PHY

La couche PHY de la norme IEEE 802.15.4 prend en charge trois bandes de fréquences [Norm54].

- La bande 868 MHz est proposée pour l'Europe.
- La bande 915 MHz est proposée pour l'Amérique.
- La bande ISM à 2.4 GHz, une bande libre proposée à l'international et à laquelle nous nous intéressons.

En vue de la complexité de l'environnement ferroviaire et les différentes perturbations électromagnétiques présentes particulièrement en basses fréquences, nous proposons un système de communication dans la bande ISM autour de 2.4 GHz.

ZigBee utilise 16 canaux (11-25) étalés sur les fréquences de la bande ISM, d'une largeur de 2 MHz et espacés de 5 MHz. La bande est de 2400 MHz à 2483.5 MHz. Ces canaux sont présentés dans la figure suivante (figure III.3) et leurs fréquences centrales sont énumérées dans le tableau III.2.

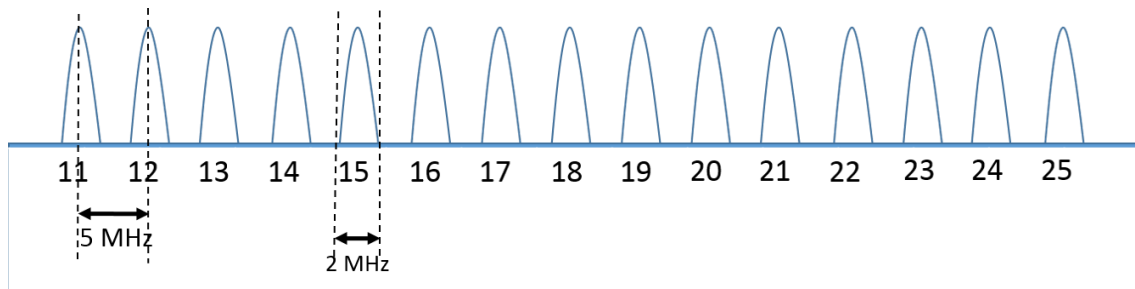


Figure III. 3: Les canaux de IEEE 802.15.4.

Canal	Fréquence centrale (MHz)
11	2405
12	2410
13	2415
14	2420
15	2425
16	2430

Canal	Fréquence centrale (MHz)
17	2435
18	2440
19	2445
20	2450

Canal	Fréquence centrale (MHz)
21	2455
22	2460
23	2465
24	2470
25	2475
26	2480

Tableau III. 2: Les fréquences centrales des canaux de IEEE 802.15.4

La couche PHY est responsable des fonctionnalités suivantes :

- La mise en marche ou en arrêt des modules radio.
- La détection de la puissance du signal sur le canal (Energy Detection (ED)).
- La transmission des informations sur la qualité de la liaison aux couches supérieures.
- La détection de l'état du médium : occupé ou non, via le mécanisme CCA (Clear Channel Assessment).
- La sélection du canal disponible pour la transmission.

La trame PHY est composée d'une en-tête (preamble), un bloc qui définit le début de la trame (start of packet delimiter), un bloc qui détermine la longueur de la trame (PHY header) et le dernier (PHY Service Data Unit) contenant les données.

La figure III.4 présente la trame physique de IEEE 802.15.4.

Preamble	Start of packet delimiter	PHY Header	PHY Service Data Unit (PSDU)
4	1	1	127 octets

Figure III. 4: La trame PHY de la norme IEEE 802.15.4.

III.1.4. Couche MAC

La couche MAC contrôle l'accès au canal et garantit l'intégrité des données entre les modules ZigBee. Elle permet la livraison des trames reconnues et l'association/dissociation des nœuds aux coordinateurs. Les réseaux ZigBee sont essentiellement composés d'un ou de plusieurs coordinateurs WPAN, surveillant l'ensemble du réseau, et gérant les associations et les connexions entre les nœuds et les coordinateurs.

La couche MAC définit deux modes d'accès au réseau :

- Mode coordonné : où le coordinateur transmet périodiquement les trames balises (Beacon) pour confirmer leur présence et synchroniser la transmission entre les différents nœuds. Ce mode permet d'optimiser la consommation d'énergie. Une fois l'information envoyée, le nœud passe en mode veille.
- Mode non coordonné : où les nœuds se basent sur le protocole CSMA/CA pour émettre. Ce protocole donne l'accès au médium une fois qu'il est jugé libre. Une unité temporelle appelée backoff est introduite afin de retarder l'émission d'une trame et éviter les collisions. Dans ce mode, les nœuds sont constamment actifs.

La couche MAC définit quatre types de trame : la trame Beacon, la trame de commande MAC, la trame ACK et la trame de données. Ces trames sont présentées dans la figure suivante.

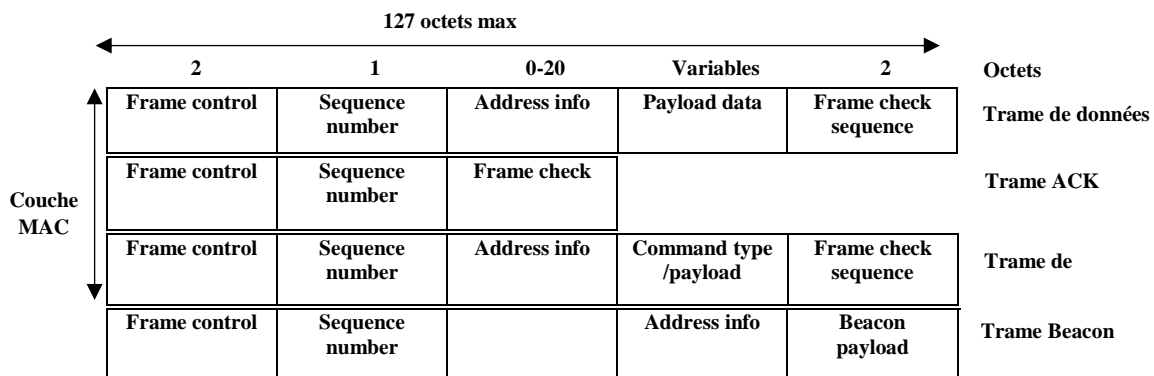


Figure III. 5: La trame MAC de la norme IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 utilise des méthodes d'étalement de spectre pour améliorer le niveau de sensibilité du récepteur, augmenter la résistance au brouillage et réduire l'effet de la propagation par trajets multiples. La méthode d'étalement requise par la norme IEEE 802.15.4 pour la bande de fréquences ISM est le DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [Nazi12]. La modulation adoptée est Offset-QPSK avec un débit de 250 kbits/s. La chaîne de transmission est présentée dans la figure ci-dessous.

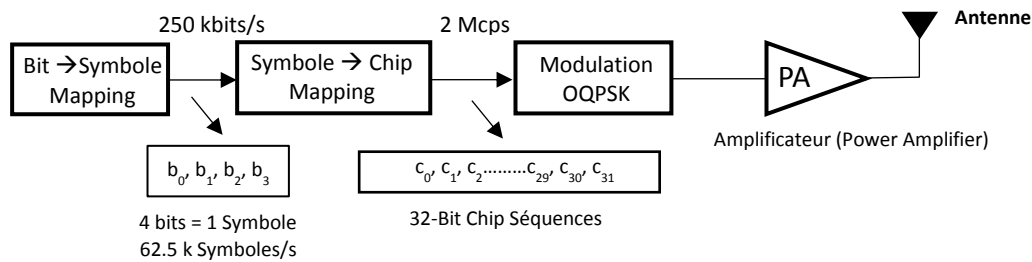


Figure III. 6 La chaîne de transmission à 2.4 GHz.

III.1.5. Présentation du réseau ZigBee déployé

La plateforme du réseau de capteurs ZigBee utilisé, a été développée et mise en place par M. BIAOU dans le cadre de sa thèse au sein du laboratoire IEMN-DOAE [Biao17]. Le développement de cette plateforme a été pensé pour permettre la gestion des auxiliaires de confort des passagers et la collecte des informations de comptage d'énergie au sein des trains de voyageurs. Deux modules ZigBee de cette plateforme ont été utilisés et étudiés selon le contexte du système proposé : un émetteur et un récepteur XBee Pro S2B [Xbee04]. Chaque nœud est composé d'une carte Arduino-DUE, d'un module XBee-Pro S2B et d'une antenne omnidirectionnelle PSKN3-24/55 RS d'un gain de 2 dBi. Le module est présenté dans la figure III.7. L'Arduino-DUE est une carte microcontrôleur basée sur le microcontrôleur Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. L'émetteur XBee est programmé comme coordinateur et le récepteur comme routeur à l'aide du logiciel XCTU. Toutes les caractéristiques sont données dans [Biao17].

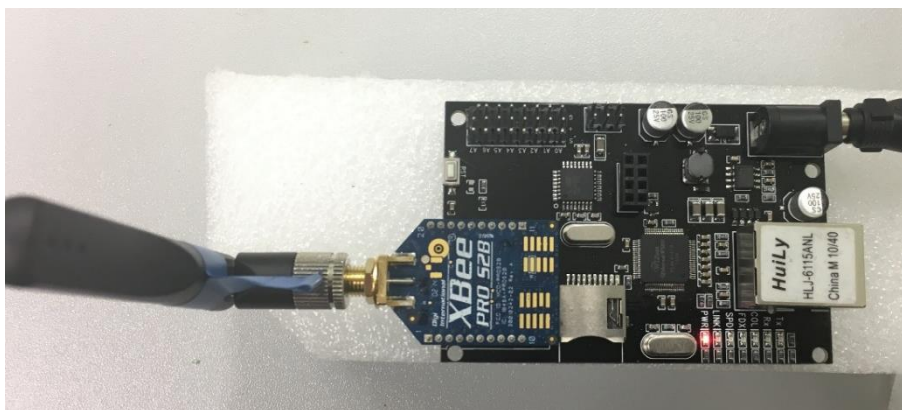


Figure III. 7: Module XBee-PRO.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les modèles de canaux proposés dans la littérature, des modèles mathématiques et empiriques qui permettent de décrire le comportement des communications sans fil selon l'environnement de propagation. Dans la partie suivante, nous étudierons la propagation à 2.4 GHz, particulièrement la technologie ZigBee en utilisant les modules ci-dessus. L'objectif est de définir les

caractéristiques de l'environnement et le comportement de la technologie pour les utiliser dans la planification. En effet, l'amplitude du signal reçu permet de définir le nombre de modules à mettre en place et leur positionnement. Nous allons présenter dans la section suivante, les résultats des campagnes de mesures effectuées selon différents scénarios. Ces mesures ont été réalisées en espace libre, en présence de véhicules et de conteneurs.

III.2. Etude de la propagation Wagon-Infrastructure

III.2.1. Caractérisation de la propagation à 2.4 GHz en espace libre

Afin de caractériser les modules ZigBee déployés et maîtriser le matériel utilisé, nous avons réalisé dans un premier temps des mesures en outdoor en espace libre. Dans ce premier scénario, nous avons utilisé deux antennes du type « Horn » déjà présentées au chapitre II, une à l'émission et une à la réception, placées à la même hauteur. Ces antennes fonctionnent dans une bande de fréquences allant de 700 MHz à 18 GHz [Viva04]. La figure suivante présente le matériel utilisé pour ces mesures.



Figure III. 8: Propagation en espace libre en utilisant des antennes Horn

Un signal en onde pure (non modulé) est envoyé via un générateur Marconi Instruments. Ce dernier est paramétré pour générer un signal de 10 dBm à 2.4 GHz. Dans cette configuration, les antennes sont en visibilité directe. La première antenne a été fixée, la deuxième est mobile et la distance varie d'un pas de 10 cm.

Afin d'étudier les deux polarisations et l'effet du diagramme de rayonnement sur la propagation, nous avons testé les deux orientations des antennes : horizontale et verticale. Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure suivante.

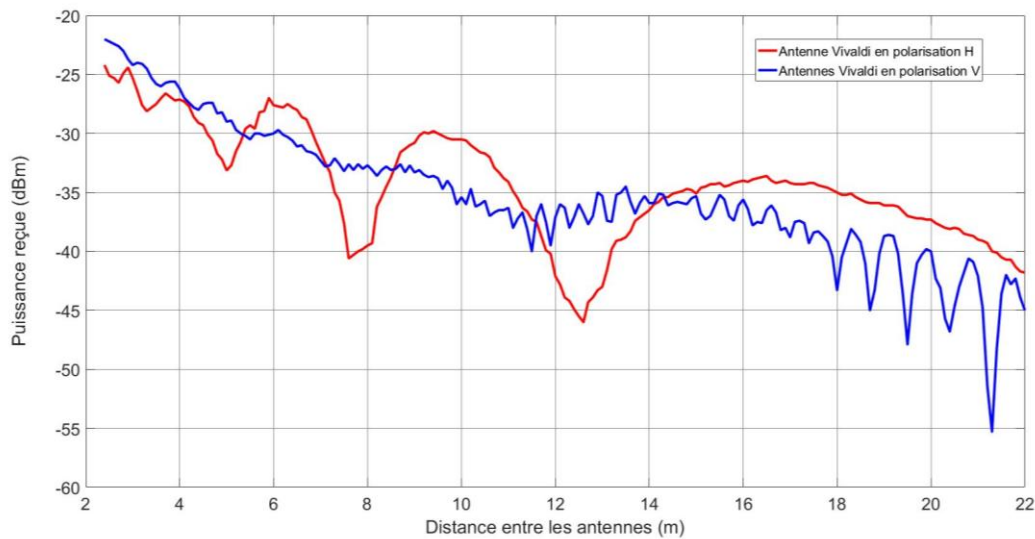


Figure III. 9: Puissance reçue par l'antenne Horn en fonction de la distance.

Les puissances reçues en polarisation verticale et en polarisation horizontale sont présentées dans la figure III.9. Ces résultats expérimentaux montrent une légère différence entre les deux polarisations. En effet, en polarisation horizontale, la profondeur des évanouissements est plus importante que celle en polarisation verticale, ce qui est dû au diagramme de rayonnement qui change avec l'orientation des antennes. L'approche théorique présentée précédemment au chapitre II avec les deux rayons (direct et réfléchi sur le sol) est en accord avec ces résultats.

III.2.2. Caractérisation de la propagation du signal ZigBee en espace libre

Pour caractériser le module ZigBee, nous avons mesuré la puissance reçue en fonction de la distance en espace libre. Le signal est envoyé par un émetteur XBee PRO S2B. La puissance d'émission réelle du module XBee a été mesurée à 7 dBm en utilisant un analyseur de spectre, contrairement à 10 dBm certifiée par le constructeur [Xbee04]. La fréquence est fixée à 2.415 GHz. Les puissances reçues sont mesurées en fonction de la distance avec l'analyseur de spectre Agilent E4407B (100 Hz – 26.5 GHz), qui est connecté à une antenne monopôle (PSKN3-24/55) mise en place en réception. Ce type d'antennes est déjà présenté au chapitre II.

Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure III.10. Les deux polarisations horizontale et verticale sont comparées.

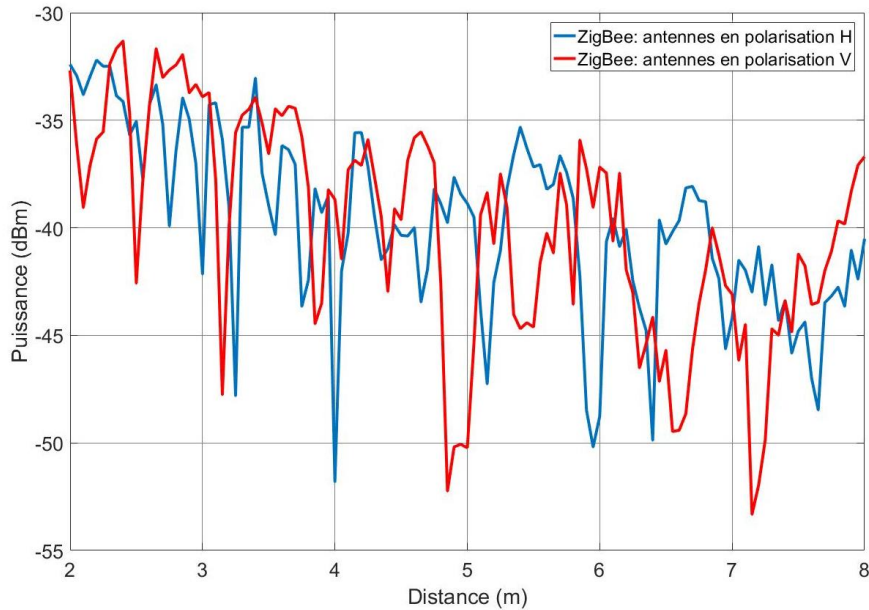


Figure III. 10: Puissance reçue par le module ZigBee en fonction de la distance.

En comparant les deux courbes, nous constatons une variation légère entre les deux polarisations. Cependant, nous remarquons une perte de presque 10 dB par rapport au scénario précédent (courbes de la figure III.9). Les antennes utilisées étant omnidirectionnelles, la puissance ne peut donc être concentrée dans une direction particulière. Dans le cas précédent, l'ouverture de l'antenne Horn est plus faible et le gain est plus élevé ce qui justifie l'écart entre les puissances mesurées.

III.2.3. Caractérisation de la propagation en présence de conteneurs

Afin de s'approcher davantage des conditions réelles de l'environnement ferroviaire de fret, nous avons effectué une campagne de mesures en présence de conteneurs. Nous gardons encore une fois le même scénario que précédemment, pour mesurer la puissance reçue en fonction de la distance entre les antennes placées à une hauteur identique (1.3 m). Dans la première partie, la propagation se fait via des antennes Horn. Par la suite, ces antennes seront remplacées par un module ZigBee en émission et une antenne monopôle en réception. Les figures III. 11 et III. 12 présentent les dimensions du conteneur et le matériel déployé.

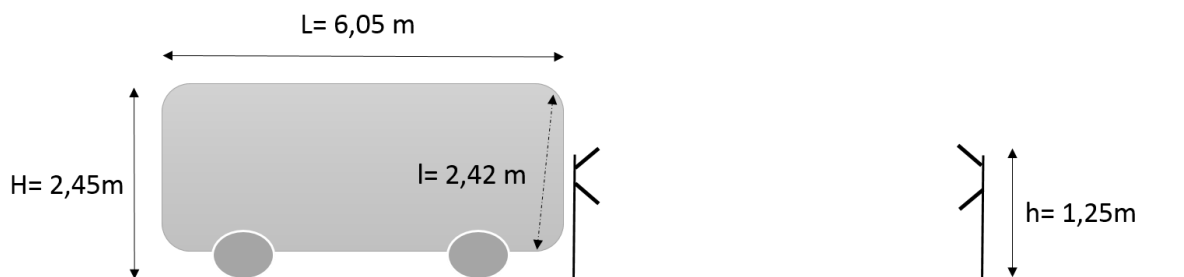


Figure III. 11: Présentations des dimensions du conteneur.

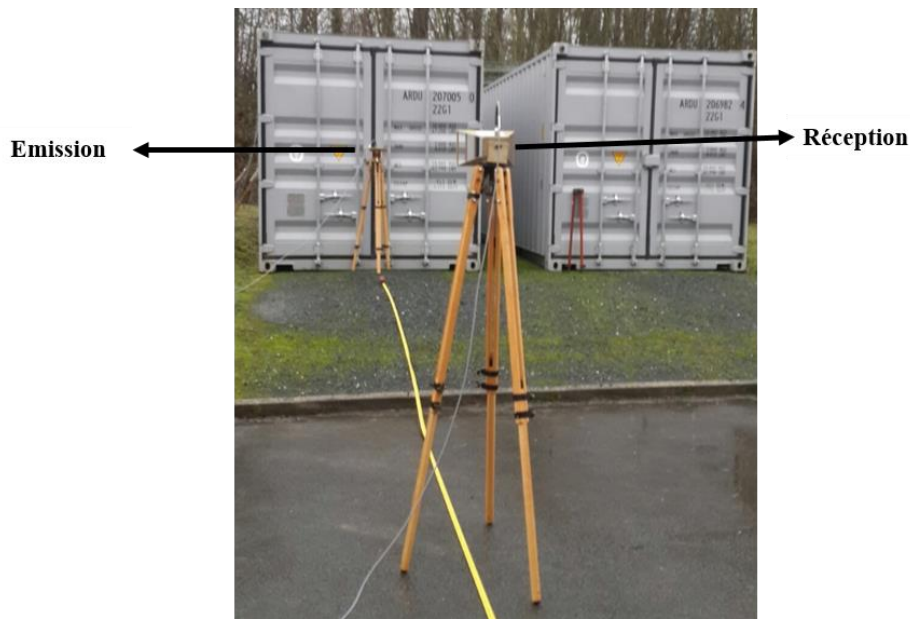


Figure III. 12: Propagation en présence de conteneurs en utilisant des antennes Horn

La puissance reçue est mesurée en fonction de la distance qui varie de 2 m à 8 m avec un pas de 10 cm. Les résultats sont présentés dans la figure III.13.

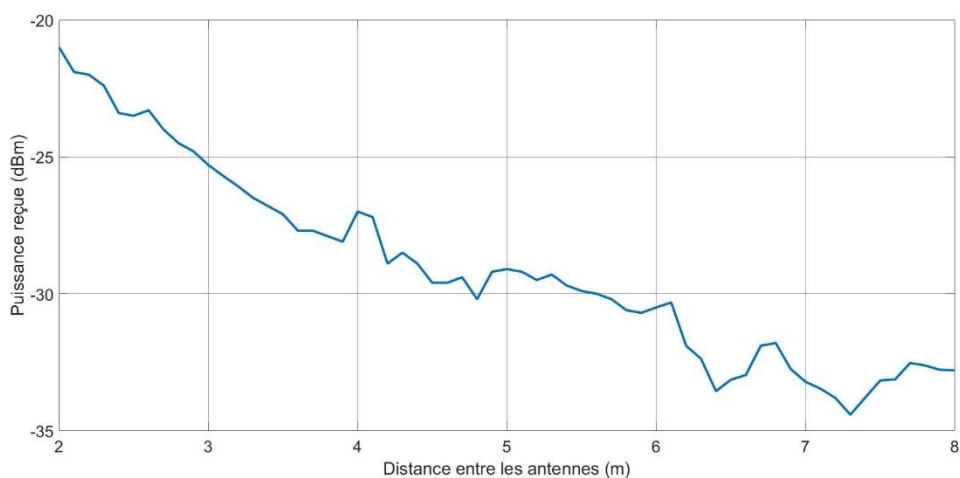


Figure III. 13: Puissance reçue par une antenne Horn en présence de conteneurs.

Nous constatons que les puissances reçues jusqu'à 4 m sont en accord avec le modèle de Friis. A partir de cette distance, nous remarquons la présence des fluctuations dues aux multi-trajets. Les antennes sont mises en place en visibilité directe. Cependant, l'environnement de propagation étant un parking, quelques voitures sont stationnées aux alentours, ce qui peut engendrer des multi-trajets particulièrement aux grandes distances.

Par la suite, nous avons remplacé les antennes Horn, par le module ZigBee en émission et une antenne monopôle (PSKN3-24/55) en réception. Les résultats des mesures sont présentés dans la figure suivante.

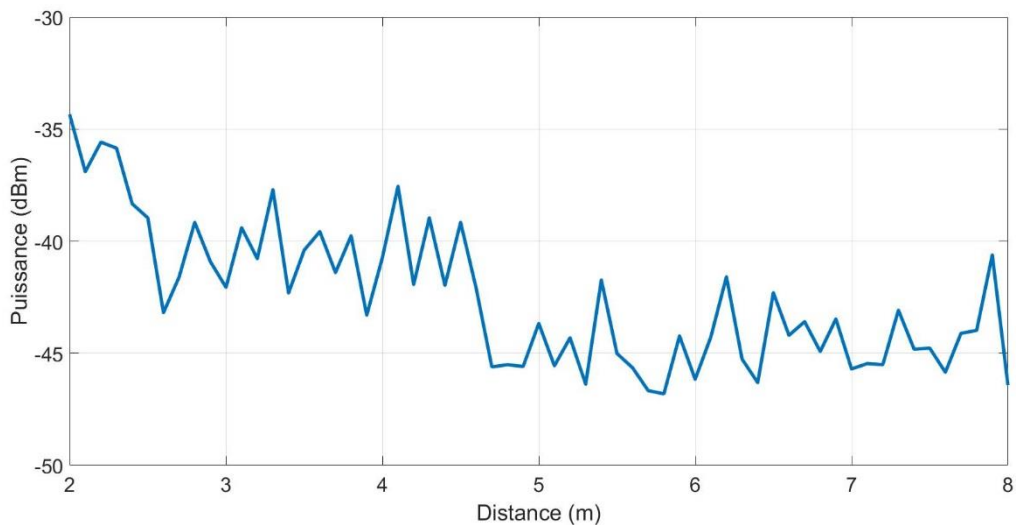


Figure III. 14: Puissance reçue par une antenne monopôle en présence de conteneurs.

Dans ce scénario, les antennes utilisées sont omnidirectionnelles, ce qui engendre des multi-trajets même à de petites distances. En comparant ces puissances avec celles reçues en utilisant les antennes Horn, nous notons une différence qui peut atteindre 15 dB comme présenté dans la figure III.15. Ceci s'explique par l'étude des bilans de liaison. En effet, les gains des antennes Horn et monopôles sont 10 dBi et 2.3 dBi respectivement et la comparaison de ces bilans de liaison Horn-Horn et monopôle-monopôle montre un écart de puissance de 15,4 dB ($2 \times 10 - 2 \times 2.3 = 15.4$ dB).

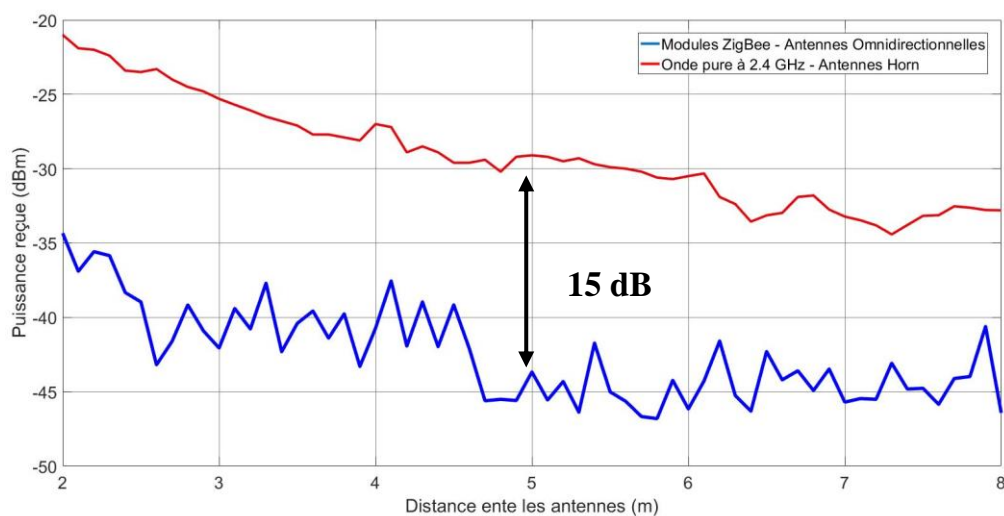


Figure III. 15: Comparaison des puissances reçues avec les antennes Horn et les antennes monopôles

Ceci nous emmène à comparer d'autres types d'antennes. Nous disposons au laboratoire IEMN en plus des antennes Horn et des antennes monopôles PSKN3-24/55, d'antennes omnidirectionnelles biconiques et d'une antenne 4-patches adaptée à 2.45 GHz.

Dans cette section nous comparons les performances des antennes dont nous disposons. A une distance fixe de 4 m, nous mesurons la puissance du signal (onde pure) envoyé à 2.4 GHz (à 2.45 GHz dans le cas d'une antenne 4-patches) et à une amplitude de 10 dBm. Le signal est envoyé via une antenne Horn et reçu par les différents types d'antennes déployées. Le tableau suivant (tableau III.3) résume les résultats des mesures.

Type d'antenne en réception	Puissance reçue
Horn	-29,5 dBm
Patch (à 2,45 GHz)	-33 dBm
Omnidirectionnelle biconique	-36,9 dBm
Monopôle PSKN3-24/55	-38 dBm

Tableau III. 3: Résultats de la comparaison des antennes pour une communication W-I.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas une grande différence entre les types d'antennes utilisées en réception, sauf dans le cas d'utilisation d'une antenne Horn. Ces antennes ont un diagramme de rayonnement moins ouvert et donc plus de gain que les autres antennes utilisées, elles permettent donc de recevoir moins de perturbations de l'environnement de déploiement et de perdre moins d'énergie. Certes, les antennes Horn restent plus performantes, toutefois leur taille les rend moins flexibles. Les antennes omnidirectionnelles biconiques sont plus performantes que les monopôles PSKN3-24/55, mais comme elles sont large bande, elles sont de grande taille ; donc il est plus pratique d'utiliser celle de taille petite qui sont plus flexibles et faciles à mettre en place. Cependant, l'antenne patch peut être une bonne alternative aux antennes PSKN3-24/55 en terme de puissance, ainsi que pour sa forme plate qui la rend facile à associer aux wagons. Cette antenne peut être installée parallèlement aux surfaces du wagon.

III.2.4. Positionnement des antennes

Comme nous l'avons cité dans le deuxième chapitre, deux scénarios sont possibles pour le positionnement des antennes afin d'assurer la communication wagon-infrastructure. Dans le premier scénario, la communication peut se faire entre des bornes fixes situées sur le bas-côté le long des rails et des antennes positionnées sur une face latérale des wagons. Dans le deuxième scénario, la communication peut se faire entre une antenne fixe sur un portique et les antennes mobiles positionnées sur le toit des wagons. Cette solution ne peut être proposée pour les wagons plats puisque les conteneurs sont mobiles et peuvent appartenir à différentes entreprises. La solution qui peut être optimale est de combiner les deux scénarios. En effet, les informations associées aux wagons, comme le poids, le contenu et les conditions de transport..., seront collectées vers la locomotive et ensuite transmises vers un point central de gestion logistique via le portique.

Parallèlement, des bornes fixes installées le long des rails pourront collecter les informations via une liaison directe avec les wagons, cela permet de les localiser même dans le cas où ils ne font pas partie d'une ligne ferroviaire (wagons isolés). Nous pouvons noter que dans le premier scénario, l'antenne fixée au portique sera plus haute que l'antenne installée sur le toit du train. Néanmoins, dans le deuxième scénario, les antennes vont être en visibilité directe et à la même ou à une légère différence de hauteur. Dans les deux cas, pour pouvoir établir la communication, les antennes doivent être dans la zone de couverture de l'antenne fixe. Similaire aux études consacrées aux liaisons sol-véhicules destinées au télépéage, comme proposé dans le projet européen DRIVE [Bara99] par exemple, nous définissons la distance d'acquisition de l'information qui dépend de plusieurs paramètres dont l'ouverture et l'inclinaison des antennes.

La figure III.16 représente la communication entre le train et l'infrastructure via un portique.

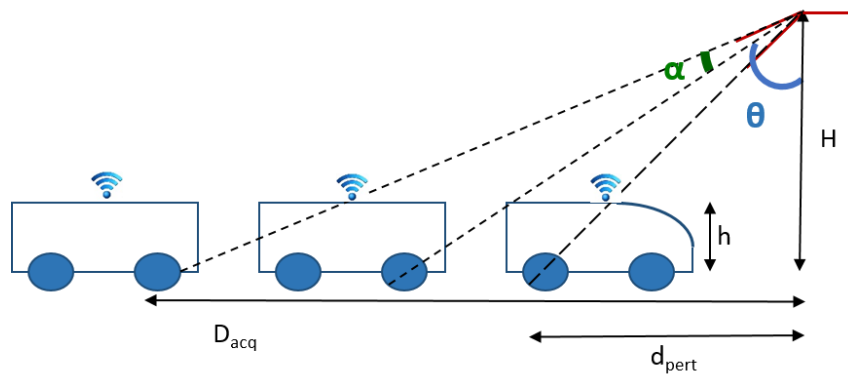


Figure III. 16: Communication train - infrastructure : antenne fixée sur un portique

h est la hauteur de la locomotive qui est égale en moyenne à 3 m, H représente la hauteur du portique, équipé d'une antenne de demi-angle d'ouverture α , orientée selon l'angle θ par rapport au plan vertical. La distance d'acquisition à partir de laquelle l'information peut être transmise D_{acq} , et la distance de perte de communication notée d_{pert} s'écrivent :

$$D_{acq} = (H - h) * \text{tg}(\theta + \alpha) \text{ et } d_{pert} = (H - h) * \text{tg}(\theta - \alpha) \quad \text{eq III. 1}$$

La zone de couverture D_{couv1} est donc la différence entre les deux distances D_{acq} et d_{pert} s'écrit donc :

$$D_{couv1} = D_{acq} - d_{pert} = (H - h) * [\text{tg}(\theta + \alpha) - \text{tg}(\theta - \alpha)] \quad \text{eq III. 2}$$

L'équation (eq III.2) permet d'identifier la relation entre les différents paramètres qu'il faut prendre en compte pour la mise en place d'une antenne fixe sur un portique.

La figure III.17 représente la communication entre les wagons et les bornes installées le long des rails.

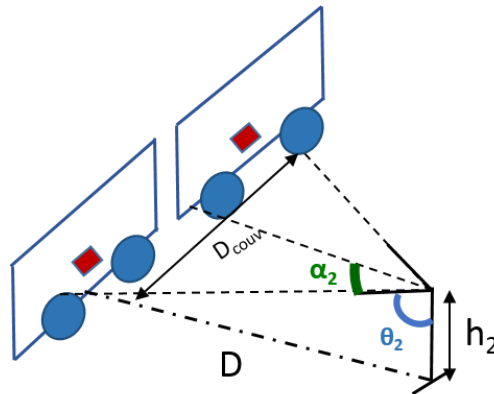


Figure III. 17: Communication train - infrastructure : antenne fixée sur le bas-côté le long des rails

h_2 représente la hauteur de l'antenne fixe. Cette dernière est de demi-angle d'ouverture α_2 , orientée selon l'angle θ_2 par rapport au plan vertical. La distance d'acquisition à partir de laquelle l'information peut être transmise D_{couv2} et la distance entre les wagons et la borne fixe notée D s'écrivent :

$$D_{couv2} = 2 * \text{tg}(\alpha_2) \quad \text{et} \quad D = h_2 * \text{tg}(\theta) \quad \text{eq III. 3}$$

III.2.5. Conclusion

Les résultats de la campagne de mesure réalisée pour caractériser la communication Wagon-Infrastructure, ont montré que la propagation du signal dans la bande de fréquences ISM en visibilité directe est en accord avec le modèle à deux rayons. En effet, la réflexion sur le sol est un phénomène important qui permet d'envoyer des signaux en l'absence de la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. Nous avons parallèlement remarqué que l'effet de la polarisation est plus visible lors d'utilisation des antennes directionnelles ce qui peut être dû au diagramme de rayonnement qui change en changeant l'orientation des antennes. Nous notons également une perte de 4 dB au minimum lorsque nous utilisons des antennes non directionnelles. Néanmoins, même avec le déploiement d'antennes monopôles la puissance exigée par la technologie ZigBee (sensibilité de XBee = -102 dBm) pour recevoir l'information est assurée. Nous avons constaté aussi que les antennes patches peuvent présenter une bonne alternative aux antennes monopôles, reste à déterminer la forme géométrique adaptée, pour faciliter leur intégration dans notre système. Enfin, nous avons défini les paramètres à prendre en compte pour l'installation de l'antennes fixe comme l'inclinaison et l'angle d'ouverture.

III.3. Etude de la propagation Wagon-Wagon

III.3.1. Caractérisation de la propagation entre véhicules

Dans le but d'étudier les performances de la technologie sans fil à 2.4 GHz, dans le cas d'une propagation wagon-wagon, les antennes ont été positionnées entre deux véhicules. Ces véhicules, des camionnettes (voir figure III.18) ont été choisis en prenant en considération la hauteur des conteneurs des véhicules de fret qui est en moyenne de 2.8 m. Les dimensions extérieures des véhicules utilisés sont : la longueur = 5.91 m, la largeur = 2.42 m et la hauteur = 2.82 m. Les antennes sont positionnées en visibilité directe, collées aux parois des deux véhicules et à une hauteur de 1.4 m (mi-hauteur des camionnettes). Dans ce cas nous ne prenons en considération que la forme des wagons et l'effet de leurs surfaces métalliques sur la propagation (l'effet de la caténaire sera étudié dans le chapitre IV.3).

Un signal en onde pure à 2.4 GHz a été envoyé via des antennes Horn. Dans cette configuration, une antenne est fixe et la deuxième est mobile en variant la distance de séparation des véhicules d'un pas de 10 cm.



Figure III. 18: Etude de la propagation entre deux véhicules

La figure III.19 illustre les puissances reçues en fonction de la distance en polarisations verticale et horizontale.

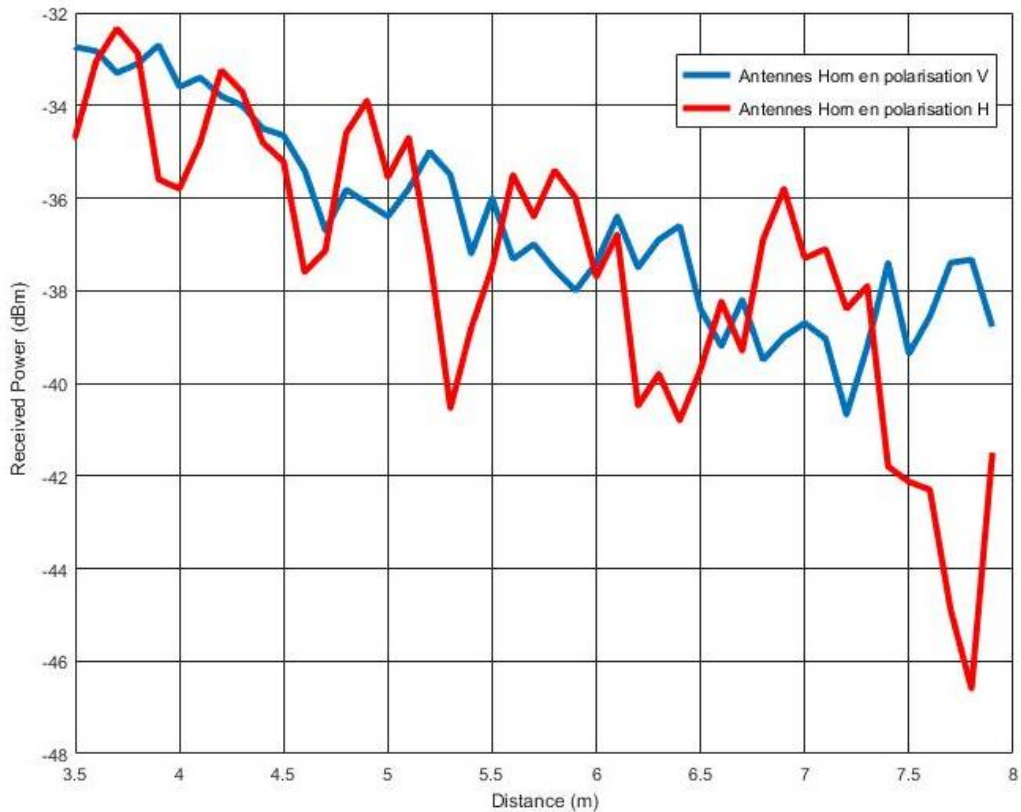


Figure III. 19: La puissance reçue en fonction de la distance
(antennes placées entre les véhicules).

Une légère différence de quelques dB entre les puissances des deux polarisations est notée, particulièrement en terme de profondeur des évanouissements. Cette profondeur est plus importante dans la polarisation horizontale. Cet écart est justifié par la différence du diagramme de rayonnement des deux polarisations (Annexe 5).

III.3.2. Positionnement des antennes pour une propagation entre de véhicules

Afin de définir le scénario optimal, une campagne de mesures a été réalisée. Dans cette partie expérimentale, l'objectif est d'étudier la performance de la technologie à 2.4 GHz, dans les trois scénarios définis auparavant.

- Dans 1^{er} scénario, les antennes Horn (polarisation horizontale) sont positionnées entre les deux véhicules, collées aux parois et à une hauteur de 1.4 m comme présenté sur la figure III.20.



Figure III. 20: Antennes placées entre véhicules à $h = 1.4$ m.

- Dans le 2^{ème} scénario (figure III.21), les antennes sont placées entre les deux véhicules à une hauteur de 2.8 m (même hauteur des véhicules)



Figure III. 21: Antennes placées entre véhicules à h= 2.8 m.

- Dans le 3^{ème} scénario (figure III.22), les antennes sont placées au milieu des toits des véhicules.



Figure III. 22: Antennes placées au milieu des toits des véhicules

Dans ces trois scénarios, les antennes sont positionnées en visibilité directe, à la même hauteur et en polarisation horizontale. Un signal à 2.4 GHz a été envoyé via un générateur à travers les antennes Horn.

La figure III.23 illustre les puissances reçues en fonction de la distance dans les trois scénarios.

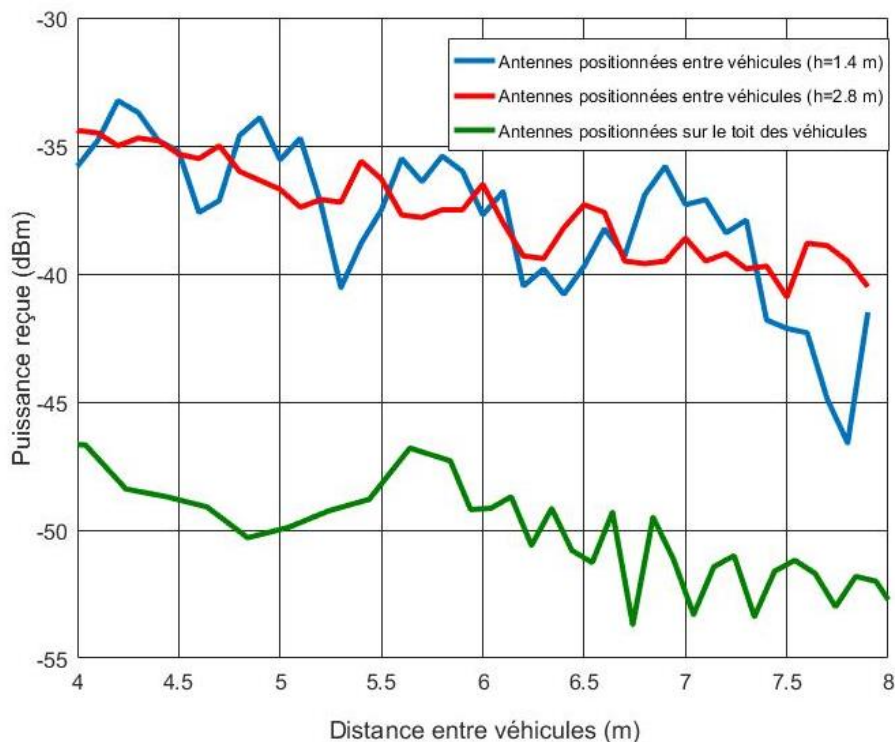


Figure III. 23: Comparaison entre les puissances reçues dans les 3 scénarios.

Nous pouvons noter qu'il n'y a pas de différence marquante entre les deux courbes des deux premiers scénarios, excepté la profondeur des évanouissements qui est plus importante dans le premier. Cependant, une différence de plus au moins 10 dB est notée quand les antennes sont positionnées sur le toit des véhicules. En fait dans ce cas, seul le trajet direct est reçu. Le deuxième trajet du modèle à deux rayons est réfléchi par les parois métalliques du véhicule et perdu dans l'espace.

III.3.3. Positionnement des antennes pour une propagation entre conteneurs

A une distance fixe de 0,8 m entre les deux conteneurs, on mesure la puissance reçue en changeant la position de l'antenne, comme présenté dans la figure III.24.

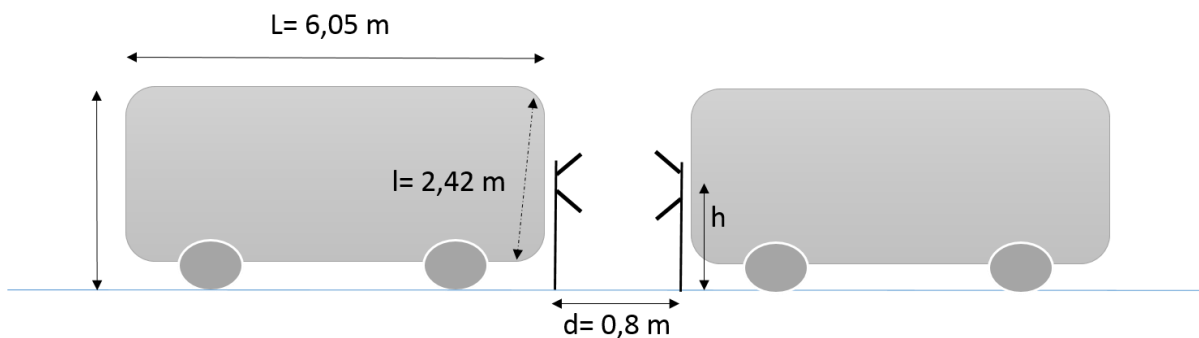


Figure III. 24: Antennes placées entre les conteneurs

Deux antennes Horn en émission et en réception sont mises en place. Les résultats sont présentés dans le tableau III.4.

Position	Puissance reçue
Au milieu «entre les conteneurs», $h=1.3$ m	-8,4 dBm
En haut «même hauteur que les conteneurs», $h=2.45$ m	-8,6 dBm
En bas «entre les conteneurs», $h= 0.5$ m	-13,42 dBm

Tableau III. 4: Puissances reçues selon le positionnement des antennes.

Par la suite, nous comparons les performances des antennes en remplaçant l'antenne de réception par les différents types d'antennes dont nous disposons. Nous mesurons la puissance du signal (onde pure) envoyé à 2.4 GHz (à 2.45 GHz dans le cas d'une antenne 4-patches) et à une amplitude de 10 dBm. Les antennes sont placées à une hauteur de 0.60 m. En effet, dans le cas des wagons plats, les modules doivent être placés au niveau des supports (d'une hauteur de 0.6 m) étant donné que les conteneurs et les caisses sont

mobiles. Les deux polarisations : verticale et horizontale sont testées. Le tableau ci-dessous présente les résultats des mesures.

Antenne en émission	Antenne en réception				
	Horn Polarisation V	Horn Polarisation H	Biconique Polarisation V	PSKN3-24/55 Polarisation V	Patch Polarisation V
Horn Polarisation V	-6,2 dBm	-9,7 dBm	-30,94 dBm	-36,7 dbm	-34,7 dBm
Horn Polarisation H	-	-	-20,82 dBm	-16,8 dBm	-16,16 dBm

Tableau III. 5: Résultats de la comparaison des antennes pour une communication W-W.

Pour une communication entre wagons, les antennes directionnelles, Horn, sont les plus performantes. Cependant comme cité auparavant, ces antennes ne présentent pas la solution optimale à cause de leur taille. L'antenne patch offre également pour cette communication, une bonne alternative aux antennes PSKN3-24/55 utilisées avec les modules ZigBee.

III.3.4. Conclusion

Les résultats de ces mesures effectuées pour caractériser la communication Wagon-Wagon, nous ont permis d'énumérer les scénarios possibles du positionnement des modules ZigBee. En effet, le choix du positionnement dépend du type des voitures de fret, qui change selon la marchandise transportée. Cependant, il faut noter que plus les antennes sont positionnées en hauteur plus elles sont proches de la caténaire et le pantographe ce qui peut engendrer des perturbations pouvant nuire à la communication. Cet aspect est étudié dans le quatrième chapitre.

Nous avons comparé par la suite, la performance des différents types d'antennes testés. Nous notons que les antennes patches présentent une bonne alternative aux antennes monopôles également pour ce type de communication.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la technologie ZigBee choisie pour le système proposé. Nous avons aussi présenté le réseau déployé pour les tests. Ensuite, nous avons effectué plusieurs campagnes de mesures pour caractériser les communications Wagon-Infrastructure et Wagon-Wagon en utilisant différents types d'antennes.

Afin de définir le positionnement optimal des dispositifs, utile pour une planification efficace, nous avons comparé plusieurs scénarios en changeant le positionnement des antennes.

Pour les deux communications W-I et W-W, nous avons constaté que les résultats des mesures sont en accord avec le modèle à deux rayons. Nous avons remarqué également que les antennes patches sont plus performantes et adaptées à l'application étudiée. En effet, ces dernières offrent plusieurs avantages par rapport à celles commercialisées avec

les dispositifs ZigBee. La forme plate des antennes patchs plus facile leur mise en place sur les wagons. Les dispositifs peuvent être placés sur les surfaces des wagons de types tombereau, couvert, citerne ou trémies. Pour les wagons plats, il est nécessaire de mettre en place des dispositifs supplémentaires sur les surfaces des conteneurs et des caisses mobiles pour faciliter la gestion logistique du transport intermodal.

La remontée de l'information de tous les wagons vers la locomotive doit être assurée. En conséquence, la transmission doit être effectuée à travers les wagons. Un lien direct via des câbles peut être mis en place à l'intérieur des wagons. Ceci garantit la transmission de l'information vers la locomotive et n'empêche pas la flexibilité de déplacement des wagons entre rames. Sinon une solution sans fil peut être installée, comme proposé dans le projet [Biao17]. Ensuite, pour transmettre les informations vers l'infrastructure, nous proposons d'installer des bornes situées sur le bas-côté le long des voies, ce qui permettra de localiser les wagons positionnés sur les rails et de vérifier l'intégrité des trains avant le roulement.

Une autre application de notre système pourrait être le suivi des conteneurs et des caisses mobiles qui ne se retrouvent pas forcément sur des rails (cas du stockage), dans ce cas, la mise en place d'un portique pourrait permettre d'assurer leur localisation.

Chapitre IV :

Les problématiques CEM présentes et étudiées dans l'environnement ferroviaire

IV.1. INTRODUCTION	91
IV.2. PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES PRESENTES DANS LE MILIEU FERROVIAIRE	91
IV.2.1. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR LE MILIEU FERROVIAIRE	91
IV.2.2. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR LES TELECOMS.....	92
IV.2.3. LES PERTURBATIONS GENEREES PAR DES ATTAQUES INTENTIONNELLES.....	92
IV.3. ETUDE DE L'EFFET DES BRUITS TRANSITOIRES SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	93
IV.3.1. CARACTERISTIQUES DES INTERFERENCES GENEREES PAR UN MAUVAIS CONTACT ENTRE LA CATENAIRE ET LE PANTOGRAPHE.....	93
IV.3.2. MODELISATION DU BRUIT TRANSITOIRE SUSCEPTIBLE D'INTERFERER AVEC LE SYSTEME PROPOSE	94
IV.4. ETUDE DE L'EFFET DES COMMUNICATIONS RADIO SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	97
IV.4.1. INTRODUCTION	97
IV.4.2. CARACTERISTIQUES DU STANDARD WI-FI (IEEE 802.11)	98
IV.4.3. COEXISTENCE WI-FI ET ZIGBEE	99
IV.4.4. MECANISMES ADOPTES PAR ZIGBEE POUR ASSURER LA COEXISTENCE AVEC D'AUTRES SYSTEMES... ..	100
IV.5. ETUDE DE L'EFFET DU BROUILLAGE SUR LE SYSTEME PROPOSE.....	102
IV.6. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS	103
IV.6.1. BANC DE MESURE DEVELOPPE	103
IV.6.2. ETUDE DE L'EFFET DE L'EVENEMENT TRANSITOIRE SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	105
IV.6.3. ETUDE DE L'EFFET DES TELECOMS SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	109
IV.6.4. ETUDE DE L'EFFET D'UN BRUIT INTENTIONNEL SUR LE SIGNAL ZIGBEE.....	115
IV.7. CONCLUSION	119

IV.1. Introduction

La CEM (Compatibilité ElectroMagnétique) traite les effets électromagnétiques indésirables qui peuvent nuire au fonctionnement d'un système électrique ou électronique. La CEM permet d'étudier la capacité d'un équipement ou système à fonctionner correctement sans être perturbé par d'autres équipements environnants (immunité électromagnétique), ni provoquer un dysfonctionnement d'autres équipements situés à proximité (émission électromagnétique). Un environnement électromagnétique est caractérisé par l'ensemble des signaux électromagnétiques et de leurs sources qui cohabitent dans cet environnement.

Le milieu ferroviaire est une structure complexe composée de plusieurs systèmes tels que les trains (matériel roulant) et l'infrastructure. La présence de systèmes fonctionnant sur des fortes puissances (alimentation des trains) et des systèmes de communication et de contrôle-commande véhiculant des signaux à faible tension, peut poser des problèmes de CEM. Par ailleurs, le nombre d'utilisateurs des radiocommunications mobiles ne cesse de croître ces dernières décennies, imposant ainsi l'installation des émetteurs de signaux radiofréquences dans le voisinage de l'infrastructure ferroviaire pour assurer la continuité du service. Ces émetteurs et les communications associées peuvent générer des perturbations électromagnétiques qui rendent plus compliquées les transmissions par onde radio que ce soit pour une communication entre wagons ou entre wagon et infrastructure. L'environnement ferroviaire constitue un système complexe sur le plan CEM. En effet, il existe plusieurs types de perturbations électromagnétiques qui peuvent être classées selon leurs sources. Nous les présentons rapidement dans la partie suivante, néanmoins, elles sont décrites en détail dans [Slim09]. Ces perturbations sont générées par le matériel roulant lui-même, ou issues de l'infrastructure d'alimentation ou bien leurs sources sont externes au domaine ferroviaire. Ces perturbations d'origines industrielles sont non-intentionnelles. Cependant, des interférences électromagnétiques peuvent être générées intentionnellement ; ces perturbations IEMI (Intentional ElectroMagnetic Interference) sont alors produites à des fins malveillantes, criminelles ou terroristes.

IV.2. Perturbations électromagnétiques présentes dans le milieu ferroviaire

IV.2.1. Les perturbations générées par le milieu ferroviaire

Les systèmes électroniques de puissance servant d'alimentation pour les moteurs électriques des trains, utilisent des composants électriques (diodes, thyristors et transistors...) fonctionnant à des fréquences supérieures à 50 Hz, et peuvent générer des perturbations électromagnétiques sur des fréquences qui peuvent atteindre plusieurs kHz [Mili14].

La caténaire est le principal composant de l'infrastructure qui permet d'alimenter les trains. Elle est considérée comme un câble électrique alimenté par les sous-stations. La caténaire peut être une source de rayonnement de perturbations électromagnétiques importantes. En effet, un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe peut générer un bruit transitoire pouvant dépasser 1 GHz [Slim09]. Il induit des émissions transitoires couvrant de larges bandes de fréquences et produisant une puissance qui peut être reçue par notre système ZigBee.

IV.2.2. Les perturbations générées par les télécoms

Ces dernières années, les technologies de communication intelligente sans fil ont rapidement progressé. L'évolution de ces technologies a permis de développer des systèmes pour la surveillance et le contrôle de l'état des trains et des infrastructures, et de mettre en place des services assurant et facilitant la gestion logistique. Notre solution doit donc cohabiter avec ces systèmes de communication, notamment les technologies qui opèrent dans la même bande de fréquences telle que le Wi-Fi.

Nous étudierons l'effet de la présence du Wi-Fi dans le même environnement que notre système, étant donné que la puissance d'émission du Wi-Fi reste la plus importante comparée à celles des autres technologies de la bande ISM.

IV.2.3. Les perturbations générées par des attaques intentionnelles

Le ferroviaire (et en particulier le fret) peut être une cible de perturbations intentionnelles, par exemple les trains transportant de la matière dangereuse ou des marchandises de valeur. Des attaques ont été commises dont nous citons quelques-unes.

En 1963, le train roulant entre Glasgow et Londres et qui transportait l'équivalent de quarante-trois millions de livres, a été dévalisé. Après avoir coupé les lignes téléphoniques, les voleurs ont piraté la signalisation du train en interrompant le signal vert du feu de circulation afin d'arrêter le train et d'y accéder.

Parmi les attaques déclarées en France en 2015 : un train de fret a été immobilisé à Marseille, par un conteneur à poubelle placé sur les voies. Le contenu n'était pas à l'espérance des malfaiteurs qui découvrent des sacs de sucres et de meubles trop lourds à transporter. Un an avant (en 2014), un train en provenance de Vénissieux (Rhône) a été arrêté par des objets posés également sur les rails. Cette fois, cinq wagons ont été dévalisés.

Les perturbations électromagnétiques peuvent être générées dans le milieu ferroviaire par des brouilleurs électromagnétiques pour des tentatives d'interruption de la communication, d'accès et modification l'information ou de mise en panne temporaire ou définitive d'un système. Nous étudierons dans ce chapitre, l'effet d'un bruit intentionnel généré afin d'interrompre la communication du système proposé.

IV.3. Etude de l'effet des bruits transitoires sur le système proposé

IV.3.1. Caractéristiques des interférences générées par un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe

Afin de caractériser les événements électromagnétiques transitoires générés lors du contact glissant entre la caténaire et le pantographe, un grand nombre de mesures a été réalisé dans le cadre du projet européen RAILCOM. Ces mesures étaient dédiées à l'étude d'immunité du système GSM-R. L'étude élaborée et présentée s'est focalisée donc sur une bande de fréquences allant jusqu'à 1 GHz [Slim09].

Une étude statistique des caractéristiques temporelles et d'amplitude des événements transitoires a été réalisée, afin de présenter le grand nombre de données collectées par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement.

Cette étude statistique a permis de modéliser l'évènement transitoire par l'expression analytique présentée dans (Eq IV.1). C'est une double exponentielle, dont les caractéristiques : temps de montée, durée et amplitude, sont définies pour se rapprocher des événements transitoires observés en pratique lors des mesures.,

$$V(t) = A \left(e^{-\frac{t}{D}} - e^{-\frac{t}{TM}} \right) \quad \text{Eq IV. 1}$$

$V(t)$ représente l'amplitude du signal transitoire en fonction du temps. A est l'amplitude crête de l'évènement transitoire, D est la durée de l'évènement et TM est le temps de montée.

La forme de cette onde pour une durée de 5 ns, un temps de montée de 0.4 ns et une amplitude crête de 0.45 V, est présentée dans la figure IV.1.

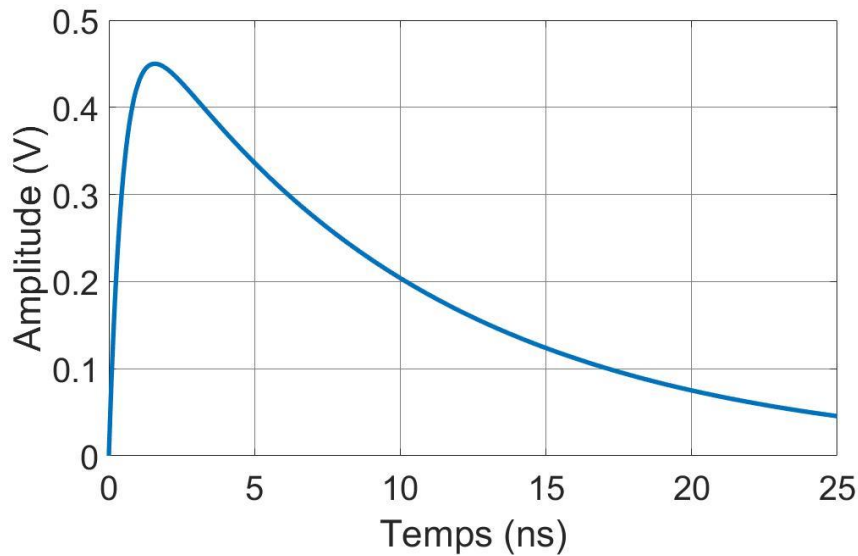


Figure IV. 1: Forme d'onde de l'évènement transitoire, $D= 5$ ns; $T_M= 0.4$ ns; $A= 0.45$ V

L'amplitude spectrale de cette forme d'onde est présentée dans la figure IV.2.

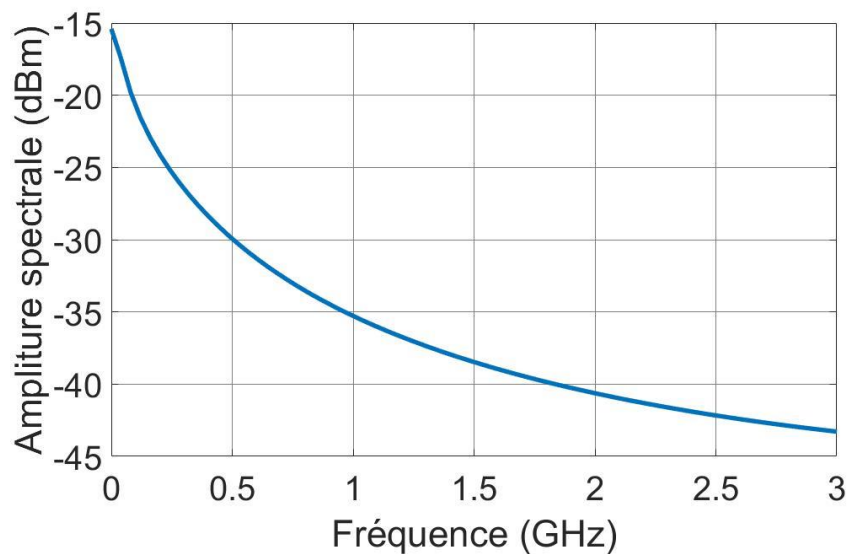


Figure IV. 2: Spectre de la forme d'onde double exponentielle.

IV.3.2. Modélisation du bruit transitoire susceptible d'interférer avec le système proposé

L'impulsion de l'évènement transitoire a été définie en se basant sur une campagne de mesures limitée à 1 GHz. Comme le montre la figure IV.2, les puissances de l'évènement transitoire se concentrent sur les basses fréquences jusqu'à celle de coupure (1 GHz).

Dans sa thèse [Rome18], Mme. Romero a proposé une étude de l'impact de telles interférences sur un réseau Wi-Fi. Dans cette étude le spectre du bruit a été déplacé autour de 2.412 GHz pour concentrer la puissance dans la bande de fréquences du Wi-

Fi (à 2.4 GHz). Ceci permet de reproduire le spectre du bruit dans la même bande de fréquences que le Wi-Fi. Cette solution est basée sur l'hypothèse qu'un bruit identique est aussi présent dans les fréquences étudiées et qu'il se comporte de la même manière qu'en basses fréquences. Cette hypothèse peut être donc appliquée indépendamment des fréquences choisies et est donc difficile à démontrer.

Afin d'étudier un cas défavorable nous supposons que le bruit reste constant à partir de 1 GHz. En effet, nous avons remarqué que le spectre simulé (figure IV.2) atteignait les hautes fréquences (jusqu'à 3 GHz) avec un écart inférieur à 10 dB entre les fréquences 1 GHz et 3 GHz, ce qui pouvait être dû au filtrage à 1 GHz de la mesure. Par conséquent, nous avons maintenu la valeur maximale du spectre à 1 GHz jusqu'à 3 GHz, que nous jugeons plus proche à la réalité.

Les deux spectres du bruit simulé à partir des mesures et proposé sont présentés dans la figure IV.3.

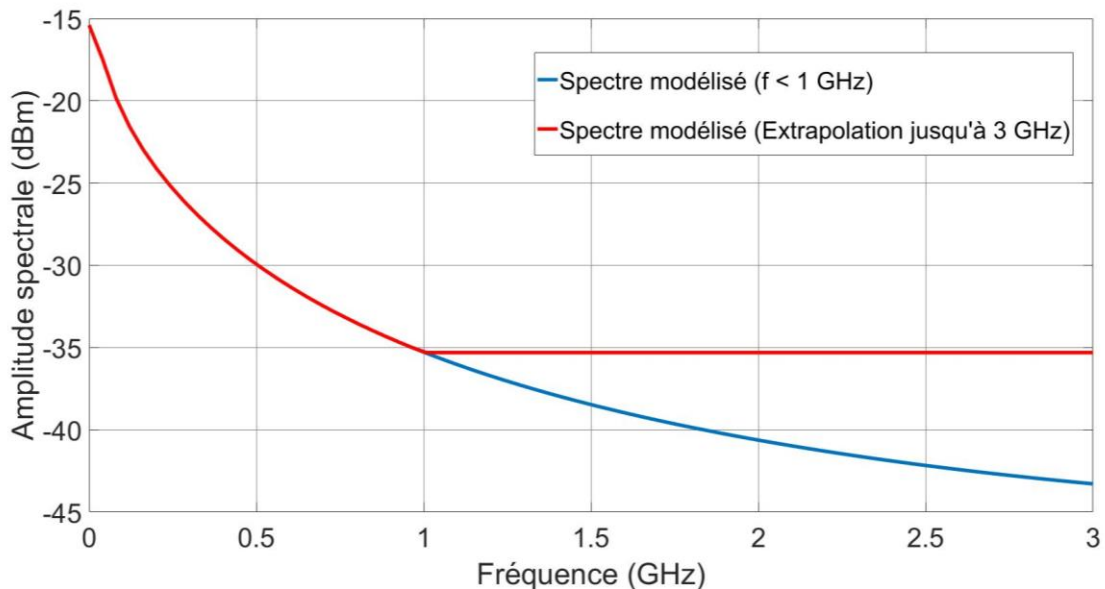


Figure IV. 3: Spectres des deux modélisations.

A partir du spectre proposé, nous avons pu définir la nouvelle forme de l'impulsion de l'évènement transitoire susceptible à perturber le système de communication radio étudié. Cette forme est présentée dans la figure IV.4

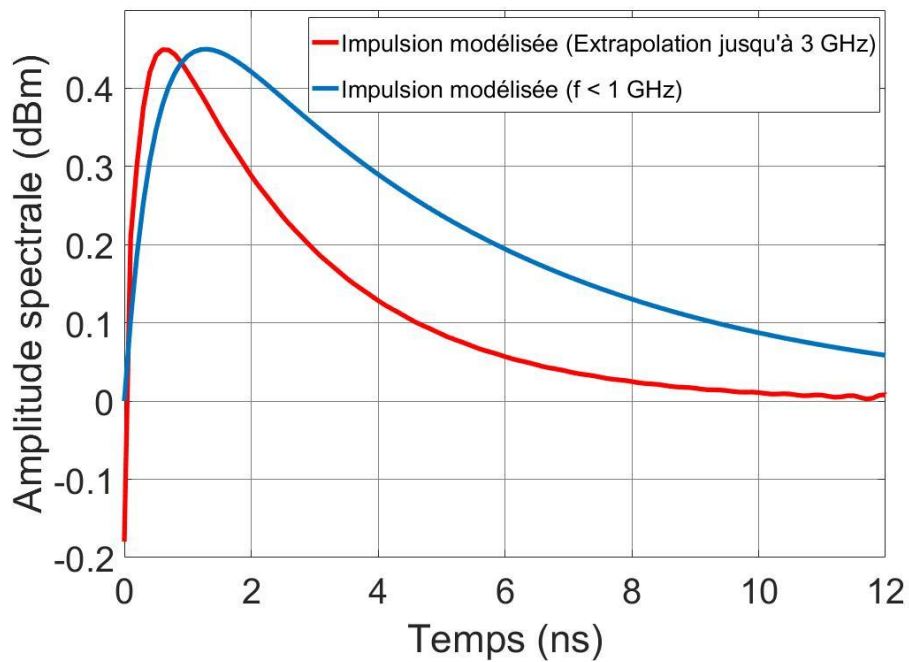


Figure IV. 4: Impulsions transitoires modélisées.

Nous remarquons que l'impulsion a plus au moins la même forme que l'impulsion moyenne définie dans les travaux présentés dans [Slim09], avec un temps de montée plus rapide, ce qui est cohérent avec un filtrage à 1 GHz des mesures initiales.

L'oscillogramme de la nouvelle forme de l'impulsion de l'évènement transitoire est présenté dans la figure IV.5

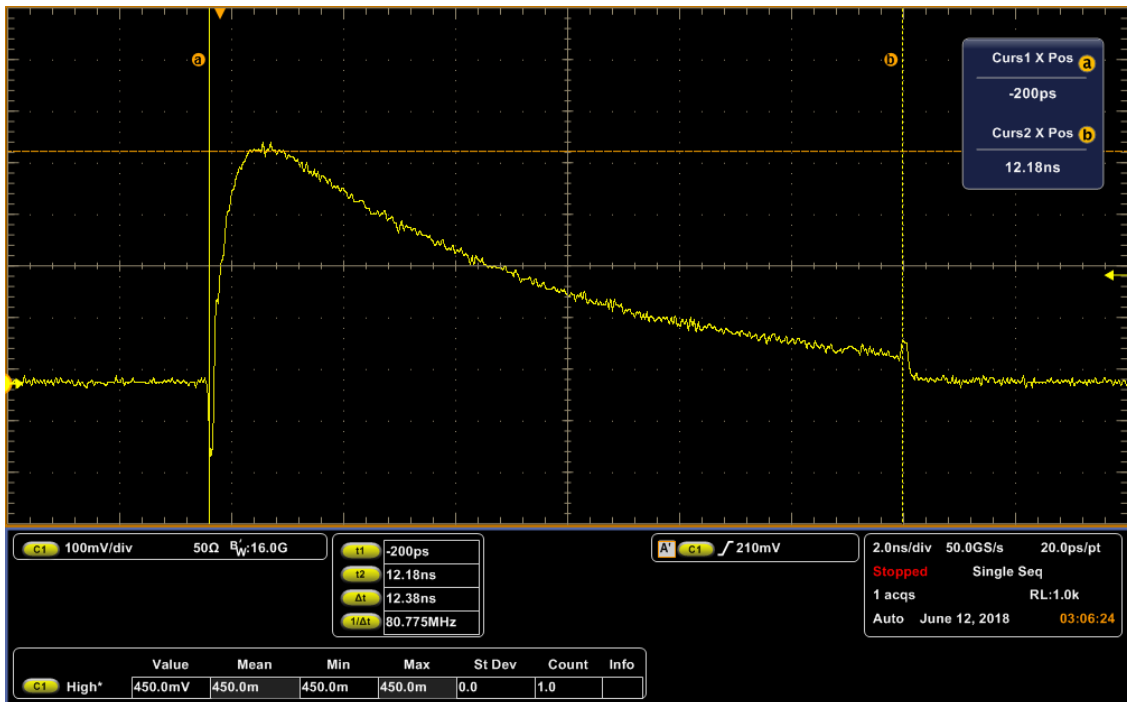


Figure IV. 5: Oscillogramme de l'impulsion modélisée (Extrapolation jusqu'à 3GHz) .

Des mesures seront effectuées avec cette forme d'impulsion pour étudier l'effet de ce bruit transitoire sur le système proposé. Les résultats seront présentés dans le paragraphe IV.5.2.

IV.4. Etude de l'effet des communications radio sur le système proposé

IV.4.1. Introduction

Différentes technologies sans fil existent dans le milieu ferroviaire pour assurer la communication à bord des trains et au niveau de l'infrastructure. Ces technologies ont été énumérées dans le premier chapitre. Un système sécurisé, robuste, fiable et qui s'adapte le mieux à l'existant, est donc exigé pour assurer les transmissions et l'échange d'informations. Le spectre de ces technologies est représenté dans la figure IV.6.

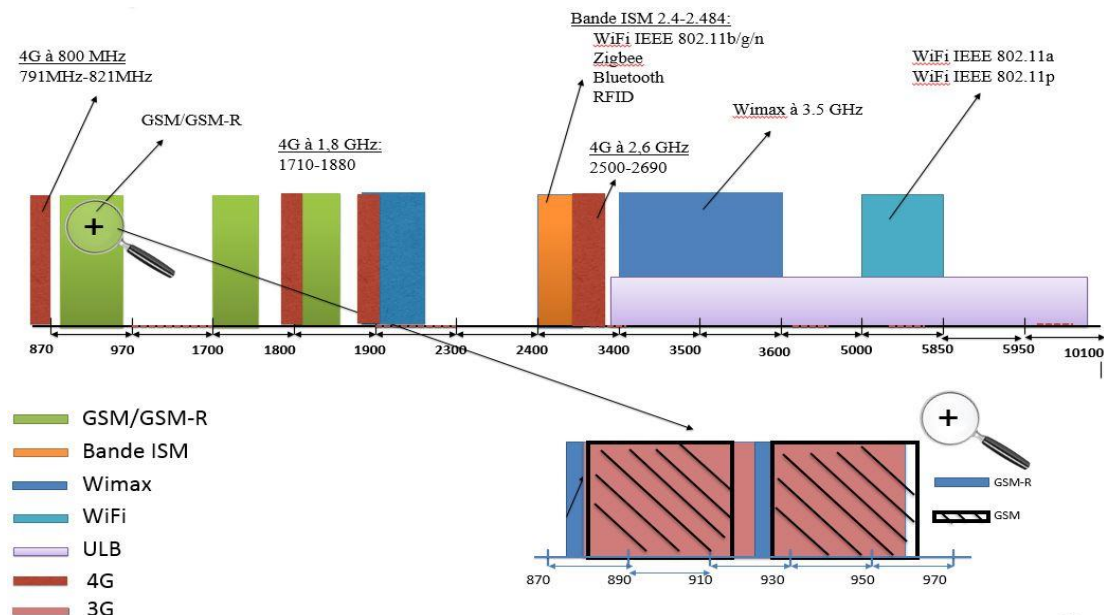


Figure IV.6: Spectre des technologies sans fil susceptibles d'exister dans le domaine ferroviaire.

La bande ISM à 2.4 GHz est une bande libre et donc attractive pour développer ou mettre en place des solutions à bas coût voire gratuites. Comme cité au premier chapitre, la bande ISM est partagée par différentes technologies comme le Wi-Fi, le Bluetooth, la RFID et aussi la technologie ZigBee proposée pour notre système. Opérer dans une bande de fréquences sans licence impose le défi de partager cette même bande avec différents réseaux sans fil. Dans la plupart des cas, la cohabitation entre ces réseaux sans fil n'est généralement pas coordonnée, et le fonctionnement d'un réseau peut nuire aux autres.

Nous présentons dans ce chapitre une étude accentuée sur la coexistence entre Wi-Fi et ZigBee, étant donné que la puissance d'émission du Wi-Fi reste très élevée par rapport aux autres technologies de la bande 2.4 GHz. En effet, les puissances transmises des

nœuds Wi-Fi et des nœuds ZigBee sont généralement de 100 mW et 1 mW, respectivement. Par conséquent, l'échange de l'information via ZigBee peut être affecté et la perte de l'intégrité de l'information peut être provoquée. Nous présentons dans la partie suivante le standard Wi-Fi et ses mécanismes de communication.

IV.4.2. Caractéristiques du standard Wi-Fi (IEEE 802.11)

La norme IEEE 802.11 (Annexe2) est une norme internationale maintenue par l'IEEE et définie par le comité 802. Elle décrit les deux premières couches du modèle OSI (Annexe 1) qui sont la couche physique (PHY) et la couche liaison de données (MAC). La norme originale a été publiée en 1997, révisée en 1999 et réaffirmée en 2003. De nouvelles propositions se sont succédées en 2012, 2013, 2014 et 2016. Diverses générations sont proposées dans cette norme, pour s'adapter au contexte et aux besoins de l'application. En effet, chaque nouvelle génération de ces normes se traduit par une augmentation du débit, de la vitesse de transmission, de la portée, de la fiabilité et de l'optimisation de la consommation d'énergie. Les générations proposées sont présentées dans l'annexe 3.

La technologie Wi-Fi offre plusieurs avantages. Elle rayonne jusqu'à 300 m en espace libre, offre un débit acceptable pour l'installation de différentes applications, et n'exige que des cartes et des bornes Wi-Fi.

IV.4.2.1. Couche PHY

La couche physique définit les spécifications et les caractéristiques matérielles, les fréquences porteuses, la technique de transmission, l'encodage et la signalisation de la transmission. La couche physique est divisée en deux sous-couches :

- La sous-couche PMD (Physical Medium Dependent) : gère l'encodage des données et effectue la modulation.
- La sous-couche PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) : se charge de l'écoute du support et fournit le CCA (Clear Channel Assessment) à la couche MAC ce qui permet d'identifier l'état du canal.

Le Wi-Fi utilise 14 canaux (1 à 14) dans la bande ISM, d'une largeur de 22 MHz. La bande est étalée sur 2400-2483.5 MHz en Europe. La largeur de bande est définie selon le pays. Ces canaux sont présentés dans le tableau IV.1.

Pays	Europe	Etats-Unis	Japon
Bande de fréquences	2.4000-2.4835 GHz	2.400-2.485 GHz	2.471-2.497 GHz

Tableau IV. 1: Bandes de fréquences selon les pays.

IV.4.2.2. Couche MAC

La couche MAC (Media Access Control) gère et maintient la communication entre les nœuds du réseau.

La couche MAC de l'IEEE 802.11 se base sur le mécanisme CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance). Avant de transmettre, le dispositif écoute le support pour définir son état. Si le support est libre durant une période spécifique appelée DIFS (Distributed Inter Frame Space), le dispositif peut transmettre durant une période aléatoire définie par l'algorithme de Backoff. Le dispositif récepteur renvoie un accusé de réception (ACK). La réception de l'ACK confirme qu'aucune collision n'a eu lieu. Dans le cas de non réception d'un ACK, la couche MAC retransmet la trame.

Le format général de la trame MAC est présenté dans la figure IV.7.

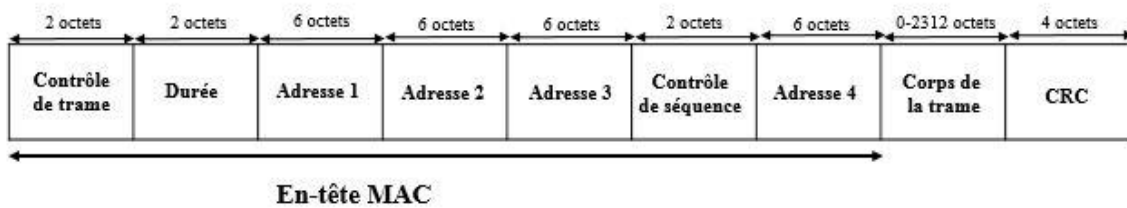


Figure IV. 7: Le format général de la trame MAC de IEE 802.15.4.

IV.4.3. Coexistence Wi-Fi et ZigBee

Les deux réseaux Wi-Fi et ZigBee exploitent la même bande de fréquences et ont été largement déployés dans un grand nombre d'applications dans lesquelles ils doivent coexister. Durant ces dernières années, la coexistence entre le Wi-Fi (particulièrement les deux génération 802.11b et 802.11g) et ZigBee a été largement étudiée. Des expérimentations ont démontré que la perte d'intégrité de l'information envoyé par ZigBee peut atteindre 87% en présence d'un émetteur Wi-Fi (IEEE 802.11b) situé entre deux nœuds ZigBee [Lshu10]. Les deux normes IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11 utilisent le CSMA/CA pour l'accès au canal. En effet une station détecte l'état du canal avant de transmettre les données. Si le support est détecté libre, la station est autorisée à envoyer, sinon, la station reporte sa transmission jusqu'à la prochaine trame, en choisissant un délai d'attente aléatoire dans une gamme définie. Cela augmente le temps de transmission particulièrement dans les cas de transmissions échouées.

Les auteurs dans [Ruit11] proposent une approche basée sur le multicanal pour les réseaux ZigBee appelée MuZi. MuZi adopte trois mécanismes de base: l'évaluation des interférences, le changement de canal et la maintenance de la connectivité. L'approche d'évaluation des interférences proposée se base sur le RSSI (Received Signal Strength Indication). Quand le RSSI est supérieur à un seuil défini, cela permet de savoir que c'est bien le signal Wi-Fi qui est reçu, et donc c'est l'interférent. Sinon (RSSI < seuil) c'est le signal utile (signal ZigBee) qui est reçu. Cela permet de définir le canal occupé par le Wi-Fi et d'identifier celui optimal pour une communication ZigBee. Les canaux

Wi-Fi et ZigBee définis par les normes (IEEE 802.11b et 802.15.4) sont présentés dans la figure IV.8.

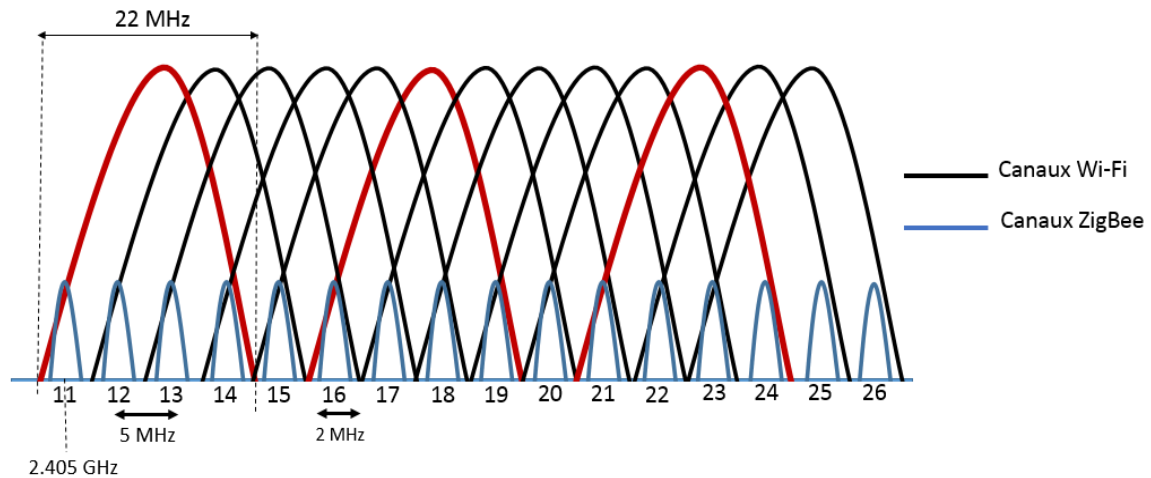


Figure IV. 8: Cohabitation des technologies IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11.

Dans le cas du Wi-Fi 802.11b, il y a 14 canaux possibles dans la bande 2,400 GHz – 2,483 GHz. Les canaux les plus utilisés sont les canaux 1, 6 et 11 puisqu'ils ne se chevauchent pas. Chaque canal Wi-Fi peut interférer avec 4 canaux ZigBee comme présenté dans la figure IV.8. Les signaux ZigBee ont une bande passante et une puissance d'émission inférieures à celles des signaux Wi-Fi, alors le CCA du Wi-Fi peut déclarer que le canal est libre alors qu'il est toujours occupé par ZigBee [Fara08]. En effet, le backoff (algorithme identifiant la période de transmission) défini par les normes est 320 μ s pour ZigBee et est 9 μ s pour le Wi-Fi (IEEE 802.11b). La synchronisation courte donne la priorité aux nœuds Wi-Fi pour accéder au canal. Cela est expliqué dans la figure IV.9.

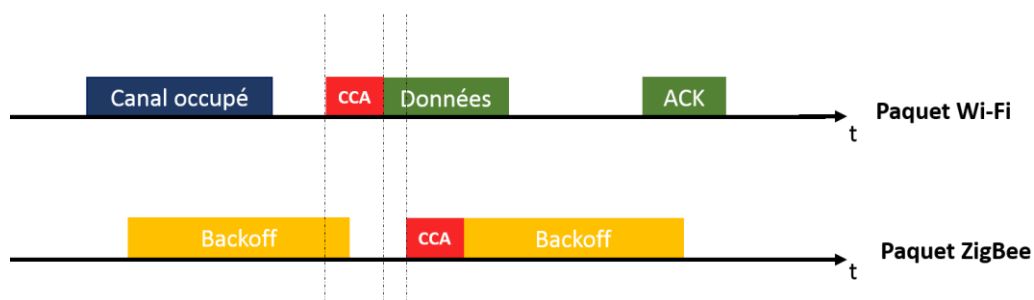


Figure IV. 9: Les chances d'accès au canal de la technologie ZigBee

IV.4.4. Mécanismes adoptés par ZigBee pour assurer la coexistence avec d'autres systèmes

La coexistence est définie comme la capacité de fonctionner à proximité d'autres dispositifs sans fil. En d'autres termes, un système avec des capacités de coexistence

peut effectuer une tâche dans un environnement donné où d'autres systèmes exécutent leurs tâches en utilisant différents ensembles de règles. Le mécanisme de coexistence est la méthode utilisée pour réduire les interférences d'un système sur un autre. Les propriétés de la technologie ZigBee, telles que la faible puissance d'émission et le mécanisme d'accès au canal CSMA/CA aident à réduire l'effet de ZigBee sur les autres technologies et sur les systèmes voisins. Les nœuds ZigBee peuvent interférer avec d'autres nœuds de la même technologie, émettant simultanément dans le même canal ou ceux adjacents. Il existe deux approches pour améliorer les performances de la coexistence des réseaux ZigBee: la méthode collaborative et la méthode non collaborative [Fara08]. Dans les méthodes collaboratives, certaines opérations du réseau ZigBee et d'un autre réseau (par exemple, un réseau IEEE 802.11b / g) sont gérées ensemble, en synchronisant les deux réseaux. En effet, chaque fois qu'un réseau est actif, le deuxième réseau reste inactif pour éviter les collisions. Dans une méthode collaborative, il doit y avoir un lien de communication entre les réseaux coexistant pour implémenter et gérer la collaboration. Les méthodes non collaboratives définissent des procédures que tout réseau ZigBee peut suivre pour améliorer ses performances de coexistence sans aucune connaissance concernant le mécanisme de fonctionnement d'éventuels périphériques sans fil interférents [Fara08]. Les méthodes non collaboratives sont basées sur la détection et l'estimation des interférences afin de les éviter autant que possible. Les méthodes non collaboratives adoptées par ZigBee pour réduire les interférences, telles que CSMA/CA sont des priorités de base de la couche physique 802.15.4 et s'appliquent dans tous les contextes. D'autres méthodes telles que le contrôle de puissance dynamique de sortie RF sont mises en place et ajoutées par le constructeur (voir paragraphe 4.3.3.3).

IV.4.4.1. CSMA/CA

Un nœud ZigBee utilise CSMA / CA avant d'initier une transmission, sauf dans le cas où un intervalle de temps est alloué (GTS : Guaranteed time slot). Le CCA (Channel Clear Assessment) permet de déterminer si le canal de fréquence est utilisé par un autre périphérique au même instant. Il est également possible de déterminer si le signal d'occupation provient d'un autre périphérique conforme à la norme IEEE 802.15.4 ou d'un périphérique fonctionnant selon une norme différente. Le CSMA/CA est utile lorsque les nœuds sans fil à proximité fonctionnant sur un standard différent ne changent pas dynamiquement leurs fréquences de fonctionnement. Si un canal de fréquence est libre pendant le CCA mais devient occupé lorsque le nœud IEEE 802.15.4 commence à émettre, l'utilisation simultanée du même canal de fréquence peut entraîner une dégradation des performances dans les deux réseaux.

IV.4.4.2. Étalement du spectre

ZigBee adopte la méthode d'étalement du spectre DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), ce qui peut également réduire les interférences causées par un réseau ZigBee

sur les autres réseaux. L'énergie totale du signal ne change pas en s'étendant. En revanche, lorsque la même énergie du signal est répartie sur une plus grande bande passante après l'étalement, l'énergie du signal par Hertz est réduite. La réduction de l'énergie d'interférence par Hertz augmente le rapport signal / interférence (SIR) et améliore les chances de récupération du signal dans le système victime du brouillage ou de l'interférence.

IV.4.4.3. Sélection dynamique de la puissance de sortie RF

L'un des procédés proposés pour améliorer la coexistence consiste à ajuster la puissance de sortie RF de l'émetteur en fonction des conditions du canal et de la distance entre les nœuds. Typiquement, la puissance de sortie RF est réglée au niveau le plus bas qui correspond à un niveau acceptable de fiabilité de communication. La réduction de la puissance de sortie de l'émetteur diminue les interférences avec d'autres appareils sans fil à proximité, mais le destinataire du signal devient plus sensible à l'interférence. Si plusieurs tentatives de livraison d'un paquet ont échoué, la puissance de sortie RF de l'émetteur peut être augmentée pour améliorer le SIR. L'augmentation de la puissance du signal peut alors améliorer les chances de succès de l'acheminement des paquets.

IV.4.4.4. Sélection de la fréquence du canal

Lorsque l'énergie d'un signal brouilleur dans le canal sélectionné est importante, changer de canal peut être un moyen simple pour éviter les interférences. ZigBee (Type Pro utilisé dans nos études expérimentales) offre cette possibilité. Si les fréquences porteuses et les largeurs de bande des signaux interférents des réseaux adjacents sont connues, le canal du réseau ZigBee peut être sélectionné et fixé afin de minimiser l'effet des signaux interférents.

IV.4.4.5. Sélection adaptative de la longueur de paquet

Un autre exemple de méthode non collaborative qui peut être utilisée dans un réseau ZigBee est la sélection de la longueur des paquets qui s'adapte aux conditions du canal. La réduction de la taille du paquet est normalement considérée comme un moyen d'amélioration du PER (Packet Error Rate) en présence de signaux interférents. De manière générale, un paquet plus petit a plus de chances d'être reçu avant qu'un interférent n'apparaisse dans le même canal de fréquence.

IV.5. Etude de l'effet du brouillage sur le système proposé

Le brouillage consiste à envoyer un signal à une forte puissance dans le but de perturber ou d'empêcher des émissions électromagnétiques. Le brouillage nécessite une connaissance des fréquences du signal victime.

Nous nous sommes intéressés à un type de brouillage fréquemment rencontré sur le marché : le brouillage par balayage (par exemple le brouilleur 8 antennes).

Celui-ci est constitué d'un signal à bande relativement étroite est balayé dans le temps à travers la bande de fréquence ciblée. Le signal vobulateur (wobbulator) interférent est le résultat d'un balayage en temps d'une période ST (Sweep time) et en fréquence de f_1 et f_2 , comme présenté dans la figure IV.10.

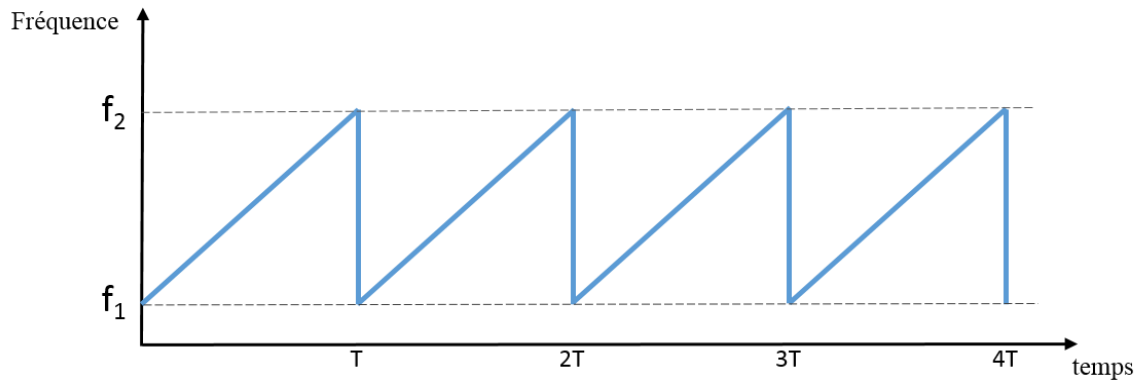


Figure IV. 10: Présentation du signal interférent : Balayage en temps et en fréquence

Le signal de brouillage (Jamming signal) est défini par l'équation IV.2

$$J(t) = P_j \cos(2\pi f(t)t + \varphi) \quad \text{Eq IV. 2}$$

Avec :

$$f(t) = f_0 + kt; \quad k = \frac{f_2 - f_1}{T_{sweep}} \quad \text{Eq IV. 3}$$

P_j est la puissance du brouillage, $f(t)$ est la fréquence instantanée, f_0 est la fréquence initiale, f_1 est la fréquence finale et T_{sweep} est le temps du balayage (Sweep time) que nous notons ST dans la suite de ce manuscrit.

Nous étudions dans le paragraphe IV.5.4. L'effet de ce type de bruit sur le système proposé.

IV.6. Expérimentations et résultats

IV.6.1. Banc de mesure développé

Dans l'objectif d'étudier les performances du système ZigBee en présence de bruits dans la même bande de fréquences, nous avons développé et mis en place un banc de mesure au sein du laboratoire. Il est présenté dans la figure IV.11.

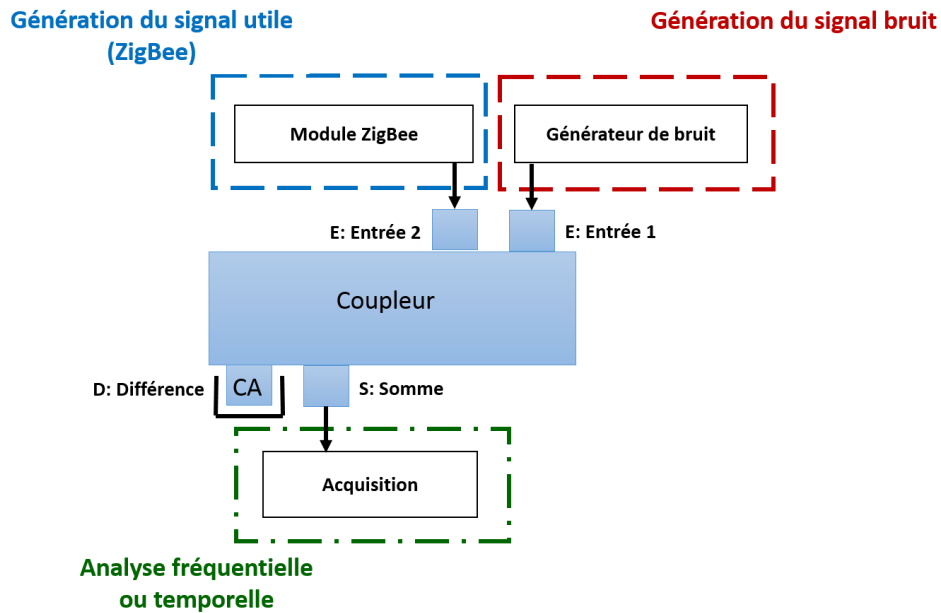


Figure IV. 11: Configuration du banc de mesure de l'immunité du système ZigBee.

Ce banc est composé des équipements suivants :

- Un générateur arbitraire : Tektronix AWG7102 (10 GS/s)
- Un module ZigBee : XBee PRO S2B
- Un analyseur de spectre : Agilent E4407B (100 Hz – 26.5 GHz)
- Un coupleur 180° additionneur: Pulsar Microwave JSO-10-471/3S (1 – 4 GHz)

Le coupleur utilisé fonctionne dans la bande 1 à 4 GHz. C'est un coupleur hybride 3dB à 180°. Ce dernier a quatre voies : deux entrées et deux sorties. Les deux entrées permettent d'envoyer les deux signaux dans le même canal. Les deux sorties ont un fonctionnement différent. La sortie S permet de faire la somme des deux signaux d'entrée et la sortie D permet d'avoir la différence entre les deux entrées. Ce coupleur dont la caractérisation est représentée dans l'annexe 4, supporte une puissance d'entrée de 20 W ce qui permet de faire varier les puissances du signal utile et du signal bruit pour définir différents niveaux du rapport signal sur bruit SNR (Signal-to-Noise Ratio). Le SNR permet de déterminer le rapport qu'il faut respecter pour que le bruit n'affecte pas la qualité de signal utile.

Trois parties principales constituent ce banc de test :

1. Génération du signal ZigBee : Le signal ZigBee est envoyé par le module Xbee Pro-S2B. la puissance d'émission est 0 dBm à une fréquence de 2.405 GHz. Ce module envoie un message de 300 octets.
2. Génération des perturbations : Trois types de bruit sont étudiés, le bruit généré par l'évènement transitoire proposé (contact caténaire-pantographe), le bruit dû aux systèmes télécom Wi-Fi, et finalement un bruit généré lors d'une attaque intentionnelle.

3. Acquisition: les données sont acquises via un module récepteur ZigBee connecté à la sortie du coupleur additionnant les deux signaux envoyés. Ceci nous permet de vérifier le contenu du message reçu pour chaque scénario.

IV.6.2. Etude de l'effet de l'évènement transitoire sur le signal ZigBee

Afin d'étudier l'immunité du système ZigBee, un générateur de signaux arbitraires (GSA) a été déployé pour générer la forme de l'évènement transitoire proposée précédemment (paragraphe 4.2.1). Le module ZigBee est configuré à la fréquence 2.405 GHz. Sa puissance d'émission est de 0 dBm. Afin d'étudier un cas défavorable, nous avons opté pour l'utilisation d'un coupleur qui permet d'additionner les deux signaux : le signal utile (signal ZigBee) et le signal bruit (évènement transitoire). La sortie S est connectée à l'analyseur du spectre qui permet d'acquérir le spectre du signal reçu. Etant donné que la différence entre les deux signaux ne sera pas étudiée, cette voie est connectée à une charge adaptée de 50 Ω . Le banc de mesure de ce scénario et les instruments utilisés sont présentés dans les figures ci-dessous (Figure IV.12 et figure IV.13).

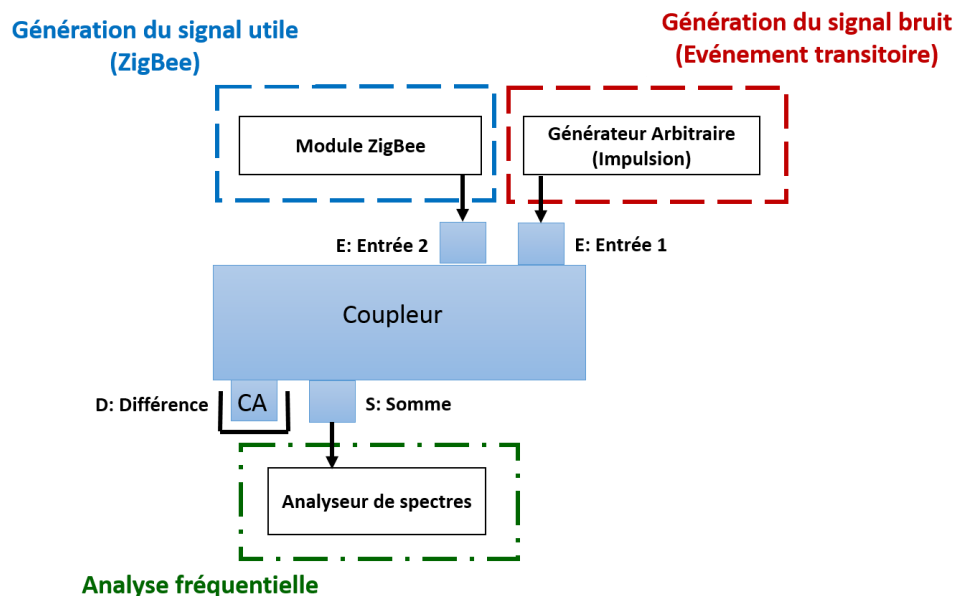


Figure IV. 12: Banc de mesure pour l'étude de l'immunité du signal ZigBee en présence du bruit transitoire.

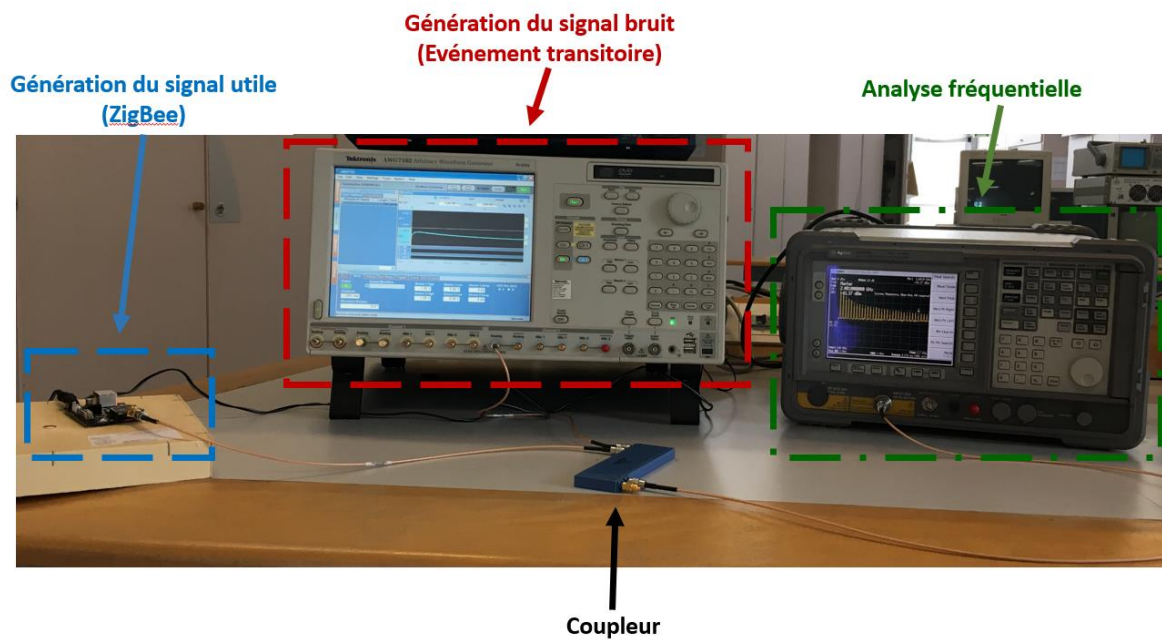


Figure IV. 13: Banc de mesure des perturbations générées par le bruit transitoire.

Le signal de l'évènement transitoire a été visualisé sur l'oscilloscope. Il est présenté dans la figure IV.14.

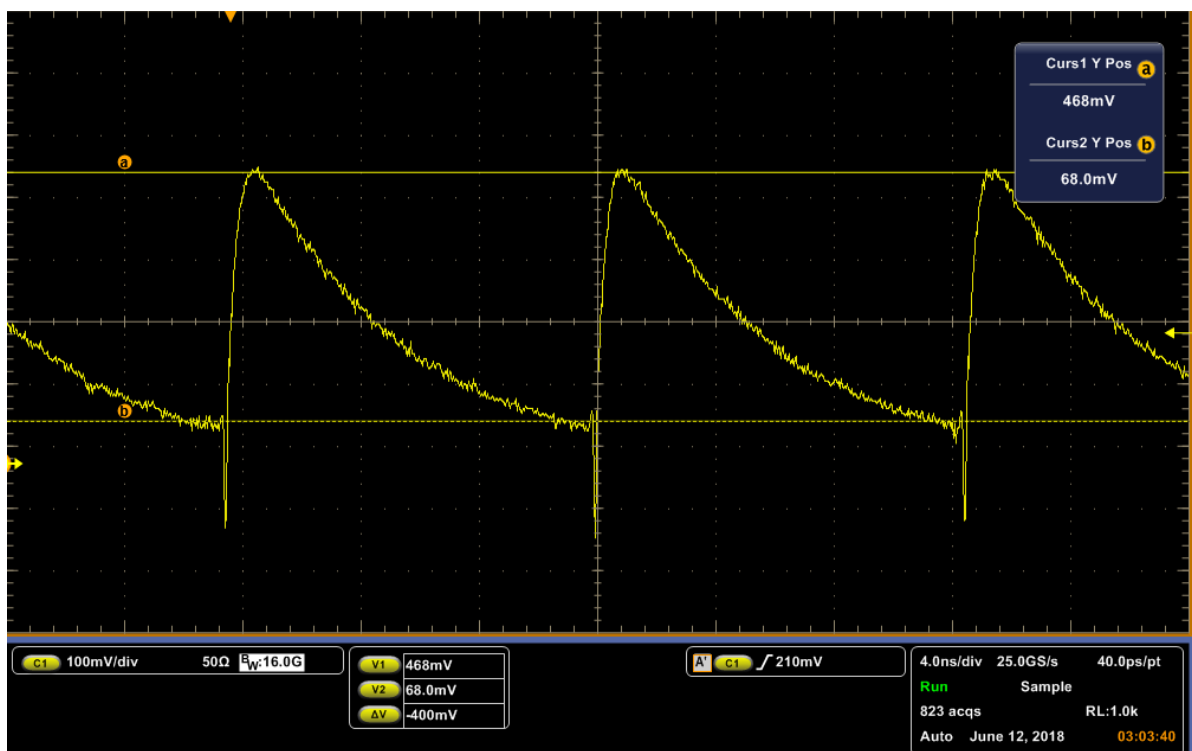


Figure IV. 14: Oscillogramme du signal transitoire généré .

La fréquence d'échantillonnage du générateur arbitraire atteint 10 Géch/s sur un seul canal avec un taux de répétition de 80 MHz, ce qui explique la répétition de l'impulsion

transitoire sur l'oscilloscope et la présence des raies sur l'analyseur de spectre (figure IV.15)

Afin de déterminer la puissance du signal bruit, le générateur arbitraire a été connecté en premier lieu directement à l'analyseur du spectre. Le spectre visualisé est présenté dans la figure suivante (figure IV.15).

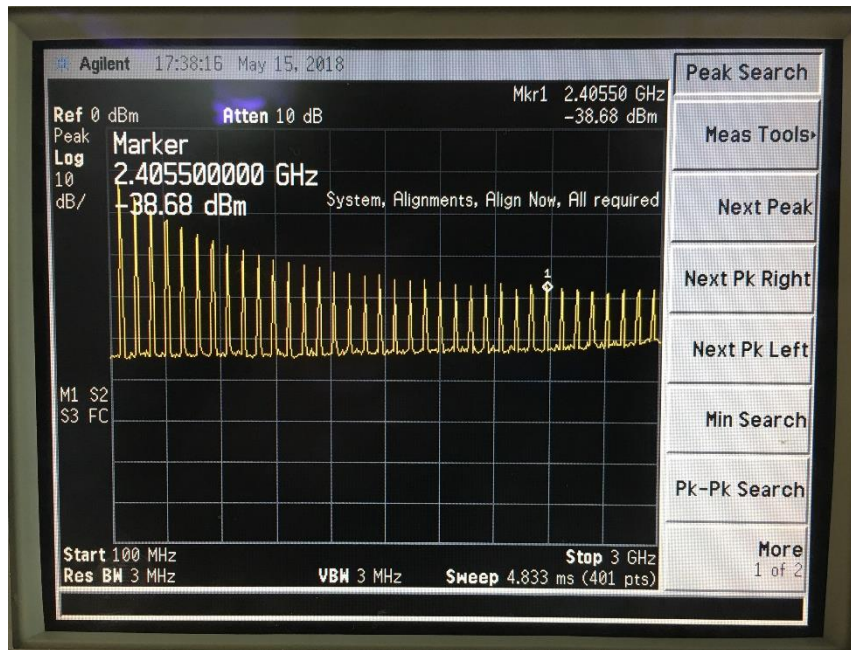


Figure IV. 15: Spectre du bruit transitoire mesuré par l'analyseur de spectre.

Nous constatons que la puissance du bruit à 2.405 GHz (fréquence de ZigBee) est de -39 dBm en moyenne (résultats de plusieurs mesures). Etant donné que la puissance d'émission de ZigBee est de 0 dBm, l'écart entre les deux puissances est de presque 39 dB. A cet écart, le message est bien reçu et sans erreur.

Résultats des expérimentations et interprétations

Afin d'étudier la fiabilité du système ZigBee en présence de ce bruit étudié, nous avons utilisé un amplificateur à 40 dB et des atténuateurs allant jusqu'à 30 dB pour pouvoir avoir une marge de variation du rapport SNR. Ensuite, nous avons vérifié la transmission et l'intégrité de l'information échangée pour chaque SNR. En effet, nous avons procédé comme suit:

- La puissance envoyée par le bruit transitoire a été mesurée à la sortie du coupleur après l'avoir amplifié de 40 dB. Sa valeur est passé de -39.11 dBm à -4.65 dBm. L'écart de 1.34 dB est dû à l'affaiblissement des câbles et des connecteurs.

- La puissance envoyée par le dispositif ZigBee a été mesurée à la sortie du coupleur après l'avoir atténué de 30 dB, 20 dB et 10 dB. La valeur de puissance est passée de -0.98 dBm à -36.18 dBm, -26.73 dBm et -14.63 dBm respectivement.

- Les deux signaux (ZigBee + Bruit transitoire) ont été sommé avec le coupleur. Enfin, nous avons vérifié si le message envoyé est bien reçu par un dispositif ZigBee mise en réception.

Nous présentons dans la figure suivante le schéma et le bilan de liaison pour le cas où le signal ZigBee est atténué à 10 dB.

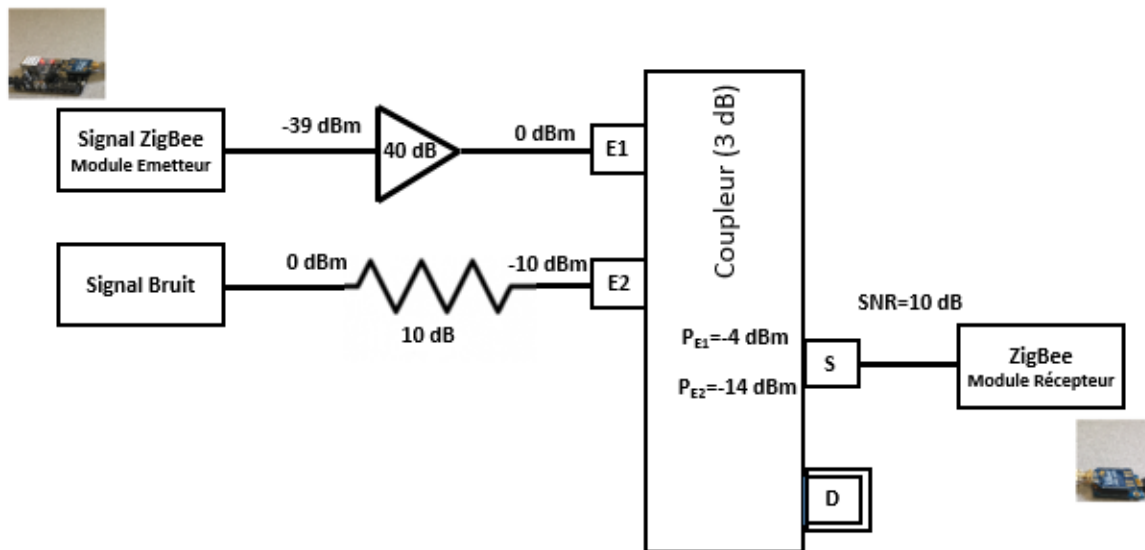


Figure IV. 16: Bilan de liaison de la transmission ZigBee en présence du bruit.

Nous présentons dans le tableau suivant (Tableau IV.2) les combinaisons possibles.

Signal	Émission (dBm)	Atténuation (30 dB)		Atténuation (20 dB)		Atténuation (10 dB)		Amplification (40 dB)	
		Liaison directe	+ Coupleur	Liaison directe	+ Coupleur	Liaison directe	+ Coupleur	Liaison directe	+ Coupleur
Bruit	-39,11	-	-	-	-	-	-	-1,51	-4,65
ZigBee	-0,98	-31,88	-36,18	-22,05	-26,73	-9,92	-14,63	-	-
SNR (dB)	-	-	31,53	-	22,08	-	9,98	-	-
Réception de l'information		☒		☒		☑		-	-

Tableau IV. 2: Résultats des expérimentations

Un seuil de SNR de 22 dB a été relevé. En effet quand l'écart entre la puissance du bruit et la puissance du signal ZigBee est supérieur ou égal à 22 dB, la communication entre les deux modules ZigBee est interrompue. Nous avons testé d'autres scénarios en atténuant davantage la puissance d'émission du signal ZigBee, et il s'est avéré que le seuil est compris entre 18 et 22 dB. Nous notons donc, que si l'écart entre les puissances est supérieur à 18 dB, le bruit généré à cause du contact glissant de la caténaire et le pantographe peut interrompre la communication entre les dispositifs ZigBee.

La sensibilité des modules ZigBee proposés et utilisés XBee-Pro S2B est de -102 dBm. De ce fait, les interférences issues d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe peuvent impacter les communications ZigBee. En effet, l'amplitude de ce bruit peut être comprise entre -35 dBm et -43 dBm, et donc selon le positionnement des récepteurs ZigBee et leur rapprochement de la caténaire, ces derniers pourront recevoir les puissances de l'interfèrent.

L'écart défini entre les puissances d'émission du signal ZigBee et le signal de l'événement transitoire doit être pris en considération lors de la mise en place des modules ZigBee. Par conséquent, nous devons prendre en considération la distance entre la position du pantographe et les modules ZigBee.

Selon les mesures effectuées dans le chapitre III, dans le cas où les antennes Horn sont positionnées sur le toit du train, nous avons remarqué que la puissance reçue à partir de 8 m pouvait atteindre -55 dBm. Sachant que les antennes utilisées sont des antennes directionnelles, nous pouvons atteindre une puissance encore plus petite avec les antennes monopôles utilisées en général avec les modules ZigBee Xbee Pro. Par conséquent, à partir de cette distance de 8 m, la communication va être interrompue puisque le seuil de 22 dB est dépassé. La solution est donc de positionner un module ZigBee supplémentaire entre les deux modules installés victimes de ces interférences. Ce module jouera le rôle de relai et permettra donc de retransmettre l'information vers le même module récepteur avec une puissance plus importante.

IV.6.3. Etude de l'effet des télécoms sur le signal ZigBee

IV.6.3.1. Simulations

Une première étude de la coexistence entre ZigBee et Wi-Fi est réalisée par simulation. Deux scénarios sont comparés. Dans le premier scénario, un réseau ZigBee est configuré. L'idée est d'associer des capteurs ZigBee aux wagons, pour assurer la communication entre chaque deux wagons adjacents jusqu'à la locomotive. Ensuite, un réseau Wi-Fi est ajouté. Afin d'étudier un cas défavorable, une application de vidéoconférence est configurée pour la communication entre les nœuds Wi-Fi. La vidéoconférence est une application qui exige un débit important vu qu'elle transmet l'image, l'audio et les données. Par conséquent, une puissance importante est nécessaire pour garder une bonne qualité de service.

Les simulations sont réalisées avec l’outil OPNET. Le scénario et les paramètres de configuration sont présentés dans la figure IV. 16 et le tableau IV.3 respectivement.

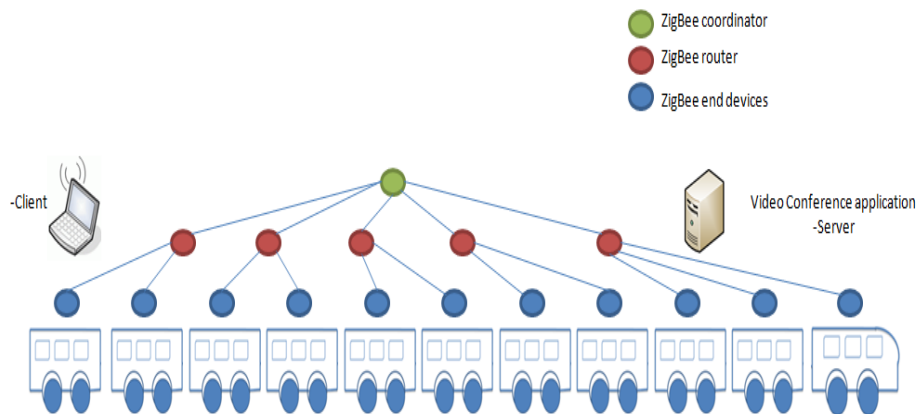


Figure IV. 17: Présentation du scénario: coexistence des réseaux ZigBee et Wi-Fi

paramètres de configuration	valeurs
nombre de nœuds ZigBee	1 coordinateur
	5 routeurs
	11 périphériques
destination	aléatoire
taille du paquet	1024

Tableau IV. 3: Paramètres de simulation.

Le débit, le temps de propagation et le délai d'accès au canal sont étudiés.

Dans un premier temps, nous modélisons le réseau ZigBee. 11 périphériques ont été positionnés en ligne droite pour respecter la configuration du train. Ensuite, nous ajoutons des nœuds Wi-Fi. Nous comparons le débit, le temps de propagation et le délai d'accès au canal des deux scénarios.

- **Le débit**

Le débit de transmission de données dans un système sans fil dépend d'un certain nombre de variables telles que la taille des paquets, la puissance du signal et la puissance du bruit présent dans le canal.

Le débit de ZigBee est inférieur à celui du Wi-Fi. Sa vitesse maximale théorique est de 250 kbits/s, bien inférieure au débit offert par le Wi-Fi. Pour évaluer l'impact de la présence du Wi-Fi dans le même environnement que ZigBee, nous comparons le débit des deux scénarios. Les résultats sont présentés dans la figure suivante.

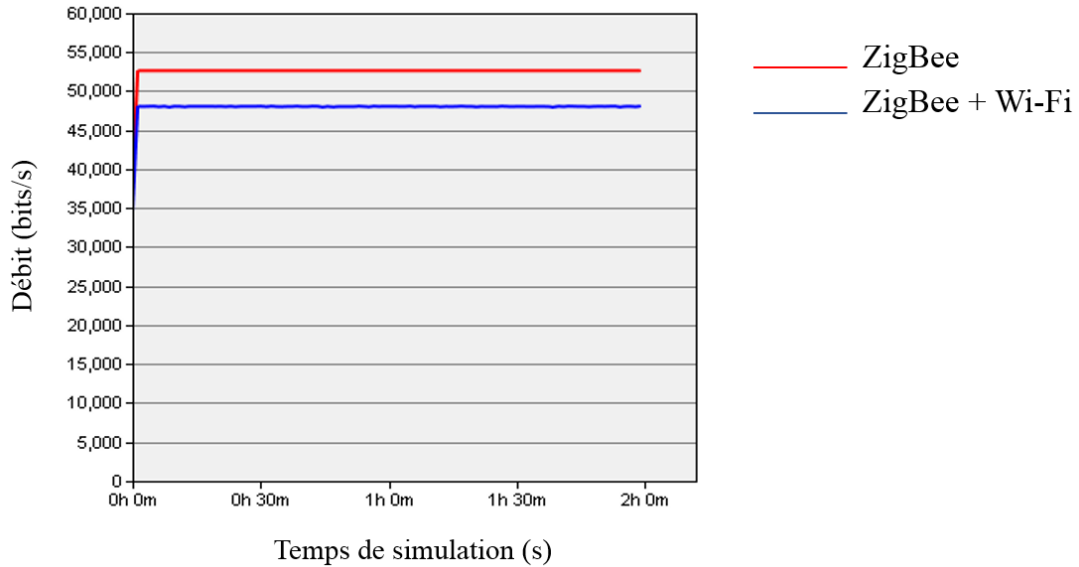


Figure IV. 18: Le débit dans le cas des deux scénarios.

Initialement, seul ZigBee est mis en place dans la simulation. Le débit est supérieur à 53 kbps (courbe rouge), débit normal pour une transmission Zigbee. Lorsque le Wi-Fi est introduit, le débit de ZigBee diminue à 48 kbits/s (courbe bleue).

On peut noter alors que le débit diminue lorsque les deux réseaux ZigBee et Wi-Fi fonctionnent dans le même environnement.

- **Délai d'accès au support**

Pour éviter les interférences, ZigBee utilise des mécanismes CCA (Clear Channel Assessment) pour détecter l'état du canal. La durée de détection est paramétré à 0,1 seconde.

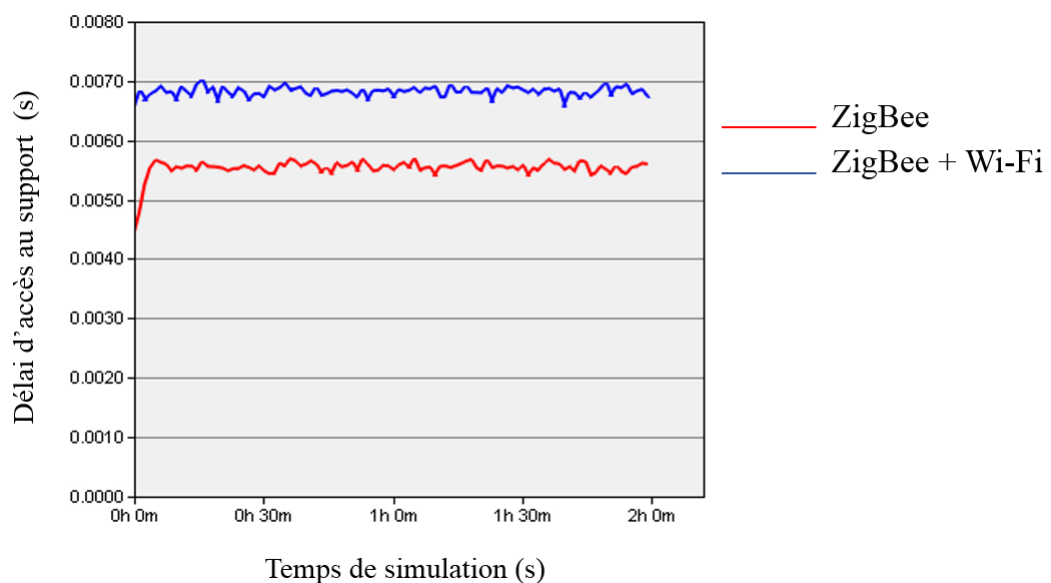


Figure IV. 19: Délai d'accès au support dans le cas des deux scénarios.

Comme présenté dans la figure IV.18, initialement, lorsque ZigBee seul est mis en place, le délai d'accès au support est inférieur à 0.0060 s. Lorsque le Wi-Fi est introduit, la valeur augmente au-dessus de 0.0060 s. En effet, la présence du Wi-Fi dans le même environnement que le réseau ZigBee fait accroître le délai d'accès au canal.

- **Le temps de propagation**

Le temps de propagation est la durée nécessaire à un signal de communication pour se déplacer de la source à la destination sur un support de transmission donné. Les performances dépendent du support physique du lien, de la distance et du débit. La figure IV.19 présente le temps de propagation dans le cas des deux scénarios en fonction du temps de la simulation.

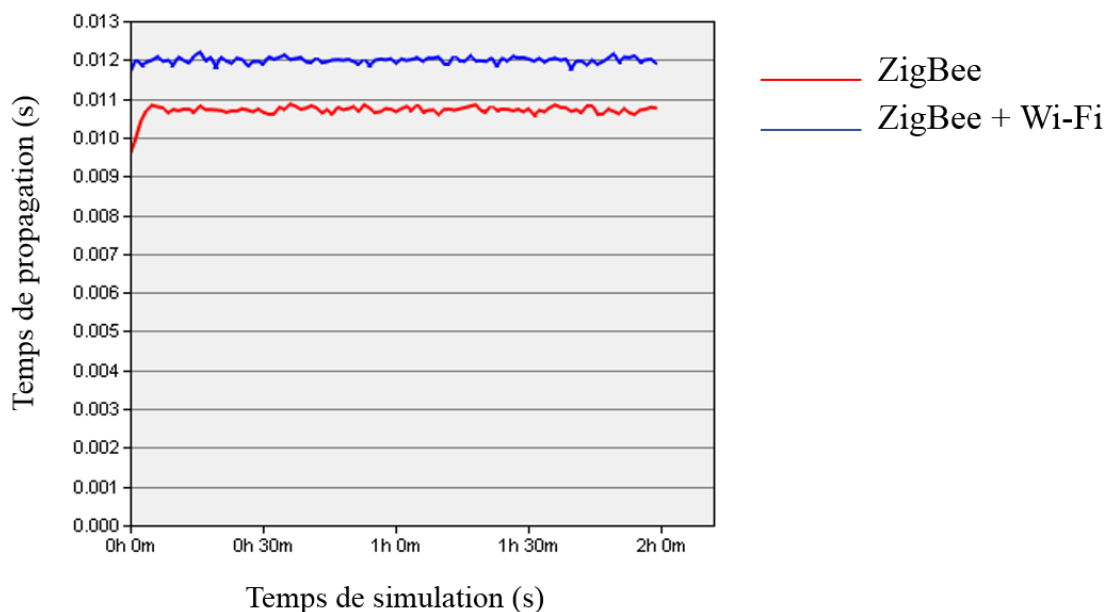


Figure IV. 20: Temps de propagation dans le cas des deux scénarios.

Le délai est inférieur à 0,011s dans le réseau ZigBee configuré (courbe rouge). Il passe à 0,012 s lorsque le Wi-Fi est introduit (courbe bleue). Cela est cohérent avec les résultats présentés dans les figures IV.16 et IV.17 puisque le délai de propagation dépend du débit et du support de transmission. Par conséquent, la diminution du débit et l'augmentation du délai d'accès au support de transmission augmente le temps de propagation.

IV.6.3.2. Expérimentations réalisées

Afin d'étudier l'immunité du système ZigBee, en présence d'une technologie à 2.4 GHz, un générateur d'onde pure a été déployé pour générer un signal à la fréquence 2.4 GHz dans un premier temps et à la même fréquence que le canal choisi pour ZigBee par la suite. Le module ZigBee est configuré à la fréquence 2.405 GHz. Sa puissance

d'émission est de 0 dBm. Afin d'étudier un cas défavorable, nous avons opté pour l'utilisation cette fois aussi du coupleur présenté dans la partie précédente, et qui a permis d'assembler les deux signaux, signal utile (signal ZigBee) et le signal bruit (générateur). La sortie S est connectée à l'analyseur du spectre et par la suite au récepteur ZigBee pour vérifier le contenu de message reçu. La deuxième sortie du coupleur (D : la différence) est connectée à une charge de 50 Ω . Le banc de mesure adopté est présenté dans la figure IV.20.

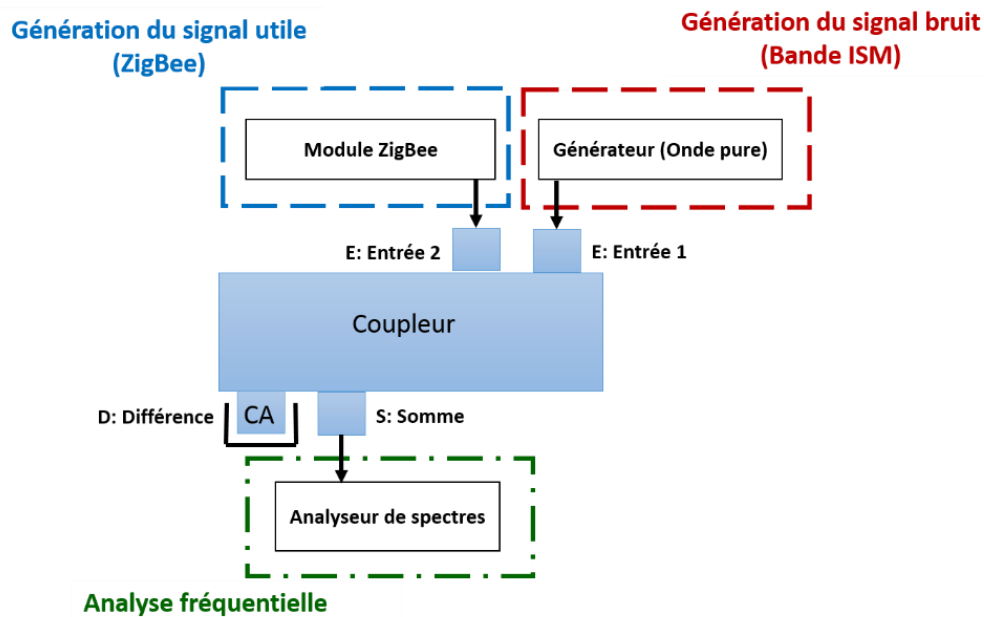


Figure IV. 21: Banc de mesure de l'immunité du signal ZigBee en présence d'un signal à 2.4 GHz.

Dans ce banc de mesure, nous gardons la même configuration des principales parties du banc étudié précédemment : la partie de génération du signal ZigBee et la partie de l'acquisition. Cependant, nous remplaçons le générateur arbitraire par un générateur d'onde : Marconi Instruments. Ce générateur permet de faire varier la fréquence et la puissance d'émission. La photo de l'expérimentation est présentée dans la figure suivante.

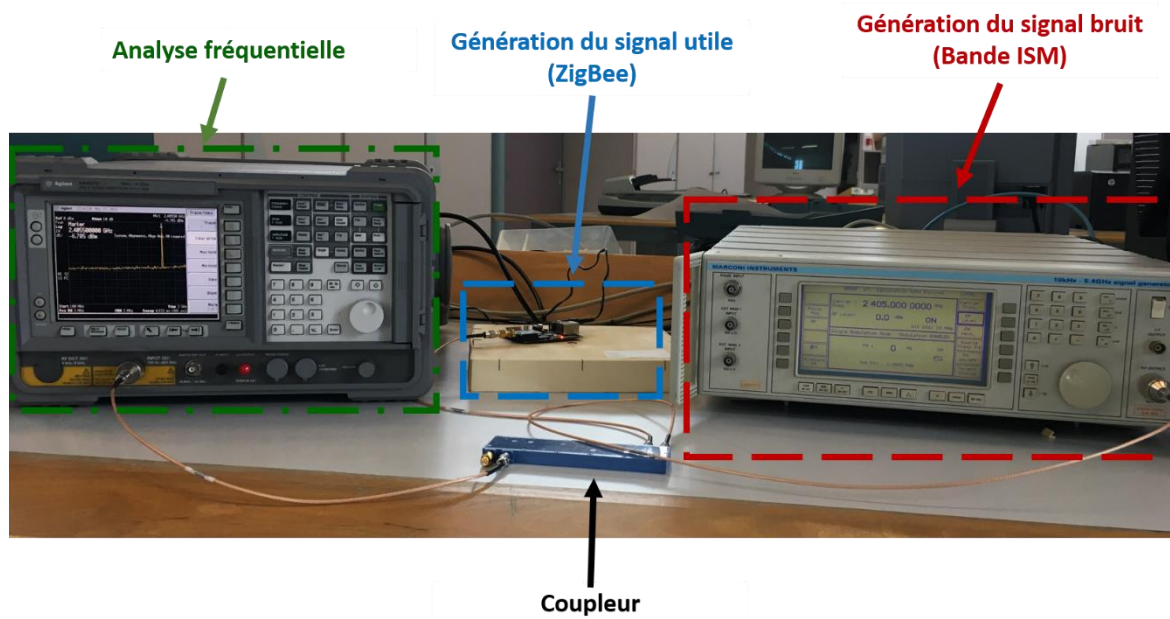


Figure IV. 22: Banc de mesure des perturbations générées dans la bande ISM

IV.6.3.3. Résultats et interprétations

Le dispositif ZigBee envoie un message de 300 octets à une puissance de 10 dBm. La fréquence du générateur de bruit a été configurée à 2.4 GHz dans un premier temps, et par la suite, nous l'avons modifié pour qu'elle soit à la même que celle de ZigBee (2.405 GHz). Enfin, nous avons fait varier la puissance du bruit et vérifié la transmission pour différentes valeurs de SNR (Signal to Noise Ratio). Les combinaisons étudiées sont présentées dans les tableaux suivants.

- **Bruit généré à 2.4 GHz**

Puissance du bruit (dBm)	Nombre d'octets reçu
0	0
-1	0
-2	0
-3	300
-4	300
-5	300

- **Bruit généré à 2.405 GHz**

Puissance du bruit (dBm)	Nombre d'octets reçu
0	0
-10	0
-20	0
-30	0
-36	0
-37	300
-38	300
-50	300

Tableau IV. 4: Résultats des expérimentations sur l'effet de la présence d'un signal dans la même bande de fréquences qu'un signal ZigBee.

Dans le cas de la présence d'un bruit généré à 2.4 GHz, la communication entre les deux modules ZigBee est établie à partir d'un rapport SNR de 3 dB. En revanche, quand le bruit est généré à la même fréquence que ZigBee (2.405 GHz), la communication n'est établie qu'à partir d'un rapport SNR de 37 dB.

La largeur d'un canal ZigBee est de 2 MHz et donc dans le premier scénario les deux canaux ne se chevauchent pas (un espacement de 500 MHz entre les deux canaux) et la puissance des lobes secondaires peut être négligée. Cependant, lorsque la puissance du bruit dépasse celle du ZigBee (à partir de 3 dB d'écart), la communication ZigBee est interrompue puisque la puissance des lobes devient importante par rapport à celle de ZigBee.

Les puissances d'émissions des technologies Wi-Fi et ZigBee sont généralement de 20 dBm et 0 dBm, respectivement. Ces puissances restent théoriques et donc l'écart de 37 dB peut facilement être dépassé. Ces deux technologies adoptent le mécanisme du CCA. Chaque technologie écoute le canal, vérifie s'il est disponible avant d'envoyer, si c'est le cas le message est envoyé. Cependant, quand le canal est occupé, la technologie se met en attente. Vu que le temps du backoff du Wi-Fi est inférieur à celui du ZigBee, la technologie ZigBee a moins de chances d'accéder au canal. Pour cela, nous proposons de fixer les canaux de transmission de ZigBee, en choisissant ceux qui ne se chevauchent pas avec le Wi-Fi. Ces canaux sont 15, 20, 25 et 26. Ces canaux sont disponibles quand les trois canaux du Wi-Fi (1, 6 et 11) sont utilisés, sinon d'autres canaux supplémentaires ZigBee peuvent être exploités.

IV.6.4. Etude de l'effet d'un bruit intentionnel sur le signal ZigBee

Dans ce paragraphe, nous étudions l'effet d'un bruit intentionnel sur les performances d'un système ZigBee. En effet, nous générons un signal de brouillage centré sur la même fréquence du premier canal ZigBee (2.405 GHz) en variant la puissance et le temps de balayage. Ensuite, nous étudierons son effet sur un signal ZigBee en déployant le même banc de mesure développé dans le paragraphe IV.5.1 et présenté dans la figure IV.22. ZigBee envoie 300 octets à une fréquence de 2.405 GHz et une puissance de 0 dBm. Le signal bruit fait un balayage de 2.4 GHz à 2.410 GHz.

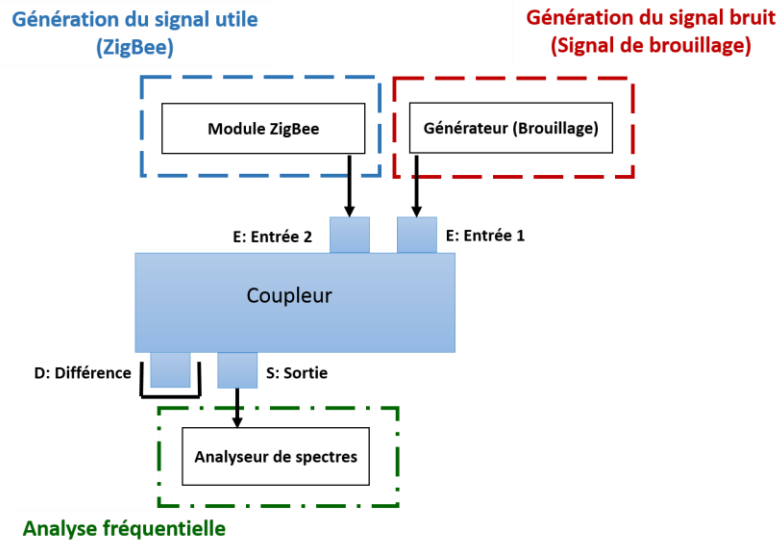


Figure IV. 23: Banc de mesure de l'immunité du signal ZigBee en présence d'un signal de brouillage.

Résultats des expérimentations et interprétations

Dans le premier scénario, nous effectuons un seul balayage de la bande de fréquence tout en variant son temps (Sweep Time). Les résultats sont présentés dans la figure IV.23.

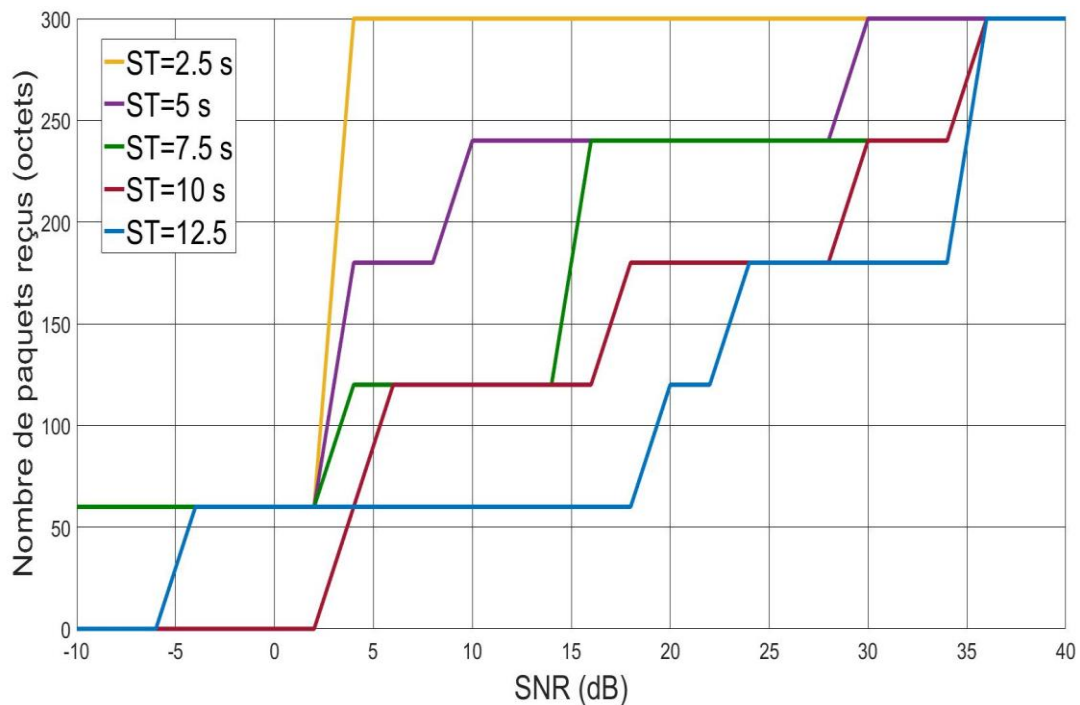


Figure IV. 24: Nombre de paquets reçus en présence du bruit balayant la bande 2.4 GHz - 2.410 GHz

Nous notons que pour un rapport SNR de 36 dB, la qualité du service est garantie indépendamment de la valeur du ST ($2.5 \text{ s} < \text{ST} < 12.5 \text{ s}$). Cependant, nous remarquons que pour un SNR inférieur à 36 dB, plus le temps du balayage est lent (ST est grand) plus le brouillage est important.

Pour un temps de balayage de 12.5 s, l'intégrité de l'information est garantie pour un $\text{SNR} > 36 \text{ dB}$. Cependant, pour un temps de balayage de 2.5 s, c'est à partir de 4 dB que la transmission est garantie. En effet, ZigBee lance le CCA (Channel Clear Assesment) pour identifier si le canal est occupé. Dans le cas échéant, ZigBee relance ce test après un temps aléatoire. Plus le temps du balayage est lent, plus les chances que le canal soit occupé sont présentes. Par conséquent la transmission est reportée pour être retransmises ou abandonnée.

Afin d'étudier l'effet du balayage, nous comparons dans la figure IV.24 les résultats du scénario où le bruit est envoyé à la même fréquence que ZigBee à 2.405 GHz (sans balayage), avec les deux scénarios où le balayage est activé à des valeurs de ST (Sweep Time): $\text{ST} = 2.5 \text{ s}$ et $\text{ST} = 12.5 \text{ s}$. Dans le premier scénario, la transmission de l'information est garantie à partir d'un SNR de 37 dB. Cependant, dans le 2^{ème} scénario ($\text{ST} = 2.5 \text{ s}$), l'information est transmise pour un SNR supérieur à 2 dB. ZigBee lance le CCA et identifie que le canal est occupé. Néanmoins, puisque le temps de balayage est rapide, l'information est transmise lors du 2^{ème} essai du CCA.

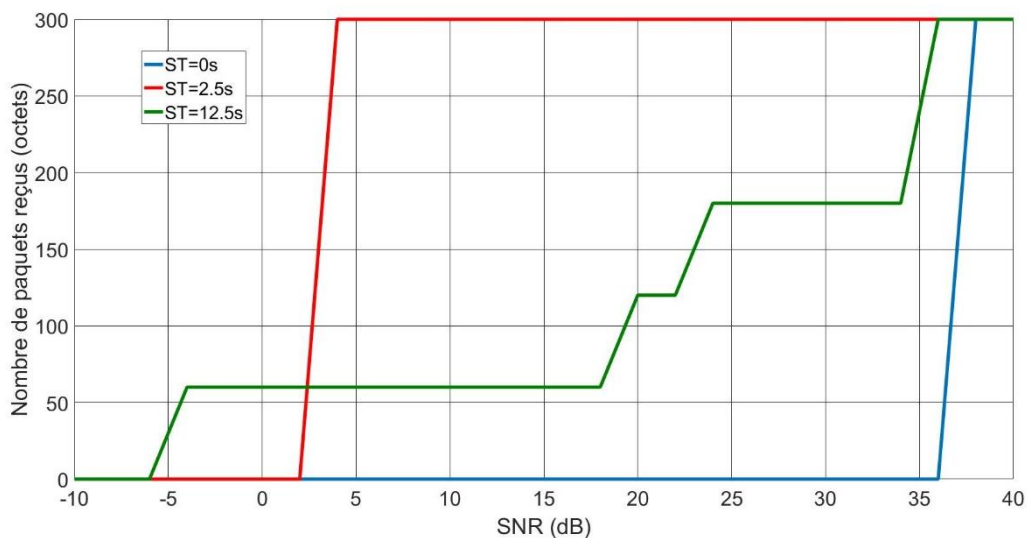


Figure IV. 25: L'effet du balayage.

Afin d'étudier davantage l'effet du mode du balayage (une seul balayage, balayage continu), nous effectuons cette fois un balayage continu de la bande de fréquence tout en variant son temps. Les résultats sont présentés dans la figure IV.25.

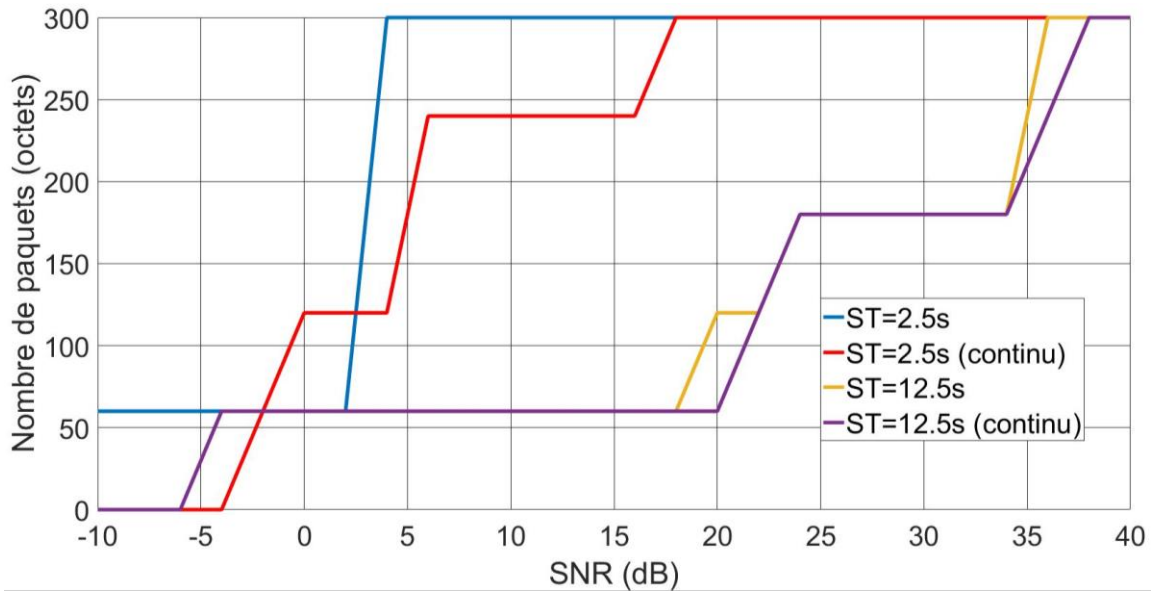


Figure IV. 26: L'effet du mode de balayage sur les performances du signal ZigBee

Nous notons que plus le balayage est lent plus l'effet du mode de balayage est présent. En effet, quand le balayage est lent, la transmission ZigBee peut être abandonnée avant la fin du premier balayage, ce qui se rapproche du cas d'un seul balayage.

En réalité, la personne malveillante visant à nuire la communication ne peut savoir l'instant de la transmission, le balayage est donc en mode continu. Dans la figure IV.25 nous présentons le nombre de paquets reçu lorsque le balayage est en mode continu pour trois valeurs de TS.

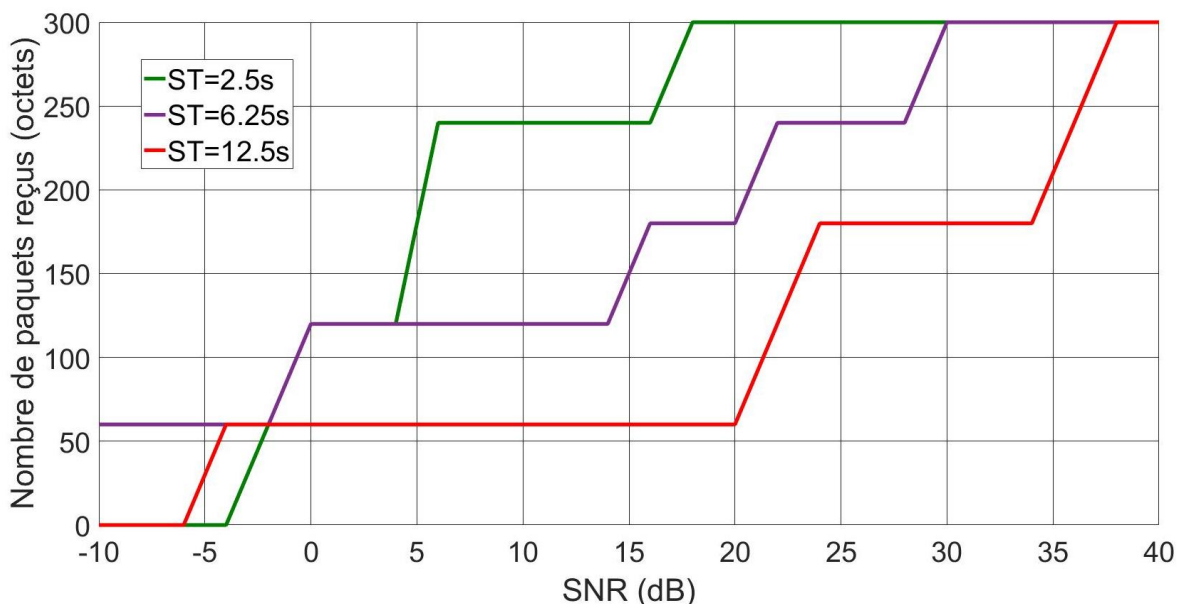


Figure IV. 27: L'effet du balayage en mode continu.

Les courbes de la figure IV.26 confirment le constat précédent. Nous remarquons que quand le temps du balayage est lent, l'intégrité de l'information est perdue à de petits

rapports SNR. En effet, le mode continu du balayage réduit davantage l'accès au canal par ZigBee.

Nous notons que pour un rapport SNR supérieur à 38 dB, la qualité du service est garantie indépendamment de la valeur du ST (pour $2.5 \text{ s} < \text{ST} < 12.5 \text{ s}$). Cependant, nous remarquons que pour des valeurs de SNR inférieure à 38 dB, plus le temps du balayage est lent plus la communication est perdue à de petits rapport SNR et donc, le brouillage devient important.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les perturbations électromagnétiques interne (milieu ferroviaire), et externe (télécoms et bruits intentionnels) qui peuvent nuire au système proposé. Nous avons étudié les performances du système basé sur la technologie ZigBee en présence du :

- Bruit transitoire généré par le contact glissant entre la caténaire et le pantographe :

Dans ce cas, un écart de 22 dB doit être respecté pour garantir la communication entre les dispositifs ZigBee. Cela doit être pris en considération lors de la planification particulièrement pour le positionnement des dispositifs.

- Bruit généré par les télécoms particulièrement le Wi-Fi :

Dans le cas de la présence d'une technologie qui communique sur le même canal que ZigBee, un écart de 36 dB doit être exigé pour assurer la communication ZigBee.

- Bruit intentionnel qui peut être généré pour des fins malveillantes :

L'effet de ce type de perturbations sur un système de communication dépend de deux paramètres : la puissance du brouillage et le temps du balayage (Sweep Time). Selon les expérimentations réalisées, la transmission est garantie à partir d'un rapport SNR de 36 dB indépendamment de la période du balayage. Cependant, pour des valeurs de SNR inférieure à 36 dB, plus le temps de balayage est grand plus l'interférent est efficace.

CONCLUSION GENERALE et PERSPECTIVES

Bien qu'il soit déclaré comme le moyen le plus économique pour le transport de marchandises lourdes, le fret ferroviaire en France connaît une baisse depuis 2008 et ne représente que 9.3 % du trafic de marchandises en 2015 selon les statistiques publiées dans [Araf15] par l'arafer (autorité de régulation des activités ferroviaires et routières).

L'objectif des travaux présentés dans cette thèse est de proposer un système de communication par onde radio entre wagons et entre wagon et infrastructure. Le but est de collecter les informations associées aux wagons et les transmettre vers un point central comme la locomotive (pour la gestion de la traction et du freinage) et la station (pour la gestion logistique). Ce système permettra d'assurer la traçabilité des wagons, de localiser les wagons isolés (appelé train du lotissement), ainsi que de garantir les conditions exigées pour le transport de marchandises sensibles.

L'analyse bibliographique présentée au premier chapitre a permis d'étudier les systèmes de communication sans fil existant dans le milieu ferroviaire. Nous avons ensuite réalisé une étude comparative des technologies utilisées et identifier la technologie ZigBee comme étant la plus optimale pour l'application envisagée. En effet, la technologie ZigBee offre plusieurs avantages pour le fret en terme de flexibilité, d'évolutivité et de faible coût d'installation. ZigBee est également une technologie qui peut fonctionner de façon autonome sous forme de petits boîtiers et qui consomment peu, ce qui est utile pour la localisation des trains du lotissement.

Le deuxième chapitre traite des conditions de propagation du signal ZigBee dans le milieu ferroviaire. Dans la première partie, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la propagation et les différents types d'antennes qui peuvent être déployées. Dans la deuxième partie, les modèles de canal de propagation existant dans la littérature, et décrivant une propagation en outdoor et à courte portée ont été exposés. Enfin, nous avons présenté les différents types de wagons de fret dont dépend le positionnement des dispositifs communicants, pour une communication Wagon-Wagon et Wagon-Infrastructure.

Pour évaluer les performances de la technologie ZigBee, des campagnes de mesures ont été réalisées et présentées dans le chapitre III. Ces mesures ont permis d'estimer la puissance reçue par le dispositif à des distances différentes et selon divers scénarios possibles. Ceci est utile pour la planification et pour le choix du positionnement des modules communicants. Ce travail a permis de choisir les antennes patchs comme étant les plus performantes pour le système proposé. Ce type d'antennes permet un gain de 5 dB par rapport à celle commercialisées avec les dispositifs ZigBee. Cette étude a permis également d'identifier le scénario optimal du positionnement des modules. Nous avons

déterminé aussi les conditions géométriques telles que la hauteur, l'orientation et l'ouverture des antennes fixes et mobiles permettant d'assurer une liaison bidirectionnelle optimale.

Le système proposé peut subir différents types de perturbations électromagnétiques. Celles-ci peuvent être générées en interne par les installations d'alimentation ferroviaire ou de l'extérieur par des émetteurs RF environnants. D'autres perturbations peuvent aussi être générées intentionnellement pour nuire au système proposé. Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté une étude des perturbations les plus susceptibles d'impacter le système proposé. Trois types de « bruit » ont été étudiés : le bruit transitoire généré par le contact glissant entre la caténaire et le pantographe, le bruit généré par un signal dans la même bande de fréquence que ZigBee et le bruit généré par un brouillage volontaire de fréquence. Des mesures ont été réalisées afin de déterminer les niveaux de SNR (Rapport Signal à bruit) exigés pour garantir la qualité de service. Les solutions proposées sont les suivantes :

- Pour le bruit transitoire : un écart de 22 dB entre la puissance du signal et la puissance du bruit transitoire doit être respecté pour garantir la communication entre les dispositifs ZigBee. Cela peut être pris en considération lors du positionnement des modules.
- Pour un bruit généré par les télécoms opérant dans la bande ISM (Industriel, Scientifique et médical) : dans le cas de la présence d'une technologie qui communique sur le même canal que ZigBee, un écart de 36 dB doit être exigé. Fixer les canaux de propagation du signal ZigBee et de la deuxième technologie comme le Wi-Fi par exemple peut être une solution à optimiser.
- Pour un bruit intentionnel de type brouillage par balayage: l'impact de ce type de perturbations dépend de deux paramètres : la puissance du brouillage et le temps du balayage (Sweep Time). Selon les expérimentations réalisées, la transmission est garantie jusqu'à un rapport SNR de 38 dB indépendamment de la période du balayage. Cependant, à partir d'une valeur supérieure à 38 dB, plus le balayage est lent plus l'interférence est efficace.

En perspectives de ces travaux à court et moyen termes, nous proposons quelques voies à explorer par exemple :

- le développement d'un prototype du réseau ZigBee à petite échelle pour permettre les transmissions « par saut » jusqu'à la locomotive, et mettre en place les protocoles qui permettent une interconnexion et une gestion optimale des données échangées entre wagons et entre wagons et infrastructure.

- des tests du prototype en environnement ferroviaire réel pour modéliser le canal de propagation et également pour identifier les perturbations susceptibles de nuire au système.
- compléter l'étude de la coexistence entre ZigBee et les autres technologies opérant dans la bande ISM (particulièrement le Wi-Fi et le Bluetooth LE), en prenant en considération les mécanismes prévus par la norme pour éviter ces interférences.
- une analyse des attaques possibles (cybermenaces) visant non seulement l'interruption de la communication, mais aussi l'accès à l'information et proposer des solutions pour pallier à ces attaques.
- le développement de logiciels permettant d'assurer l'interopérabilité du système ainsi que sa sécurité.

Annexe 1 : Modèle OSI

Le modèle OSI (Open Systems Interconnections) est un modèle théorique normalisé par l'Organisation internationale de normalisation ISO (International Standards Organization) en 1977. L'objectif est de définir un assemblage logique des composants d'un réseau afin de clarifier et décrire son fonctionnement et son architecture.

Le modèle OSI est composé de sept couches. Elles sont présentées dans la figure ci-dessous :

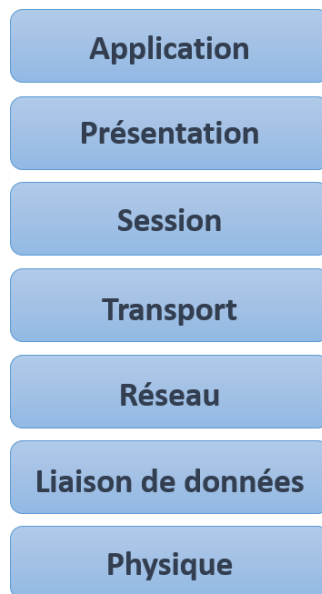


Figure A. 1: Modèle OSI

- La première couche du modèle OSI est la couche Physique. Cette couche est responsable de la transmission finale des bits de données de la couche physique de l'émetteur à la couche physique du récepteur. Elle permet aussi de gérer les données selon le type de support (électrique, optique ou radio fréquence).
- La couche Liaison de données vérifie les erreurs de transmission physique. Elle gère également l'adressage MAC en contrôlant l'accès de différents périphériques réseau au support physique. Cette couche est généralement divisée en deux parties, la sous-couche « Contrôle d'accès au support » et la sous-couche « Contrôle de liaison logique ».
- La couche Réseau ajoute le concept de routage au-dessus de la couche liaison de données. En effet, la couche réseau vérifie les adresses source et destination dans chaque trame pour s'assurer si les données ont atteint leur destination finale. Cette couche gère la traduction des adresses logiques (adresse IP) et les adresses MAC (adresse physique de l'équipement).

- La couche Transport fournit des données sur les connexions réseau. Le protocole couramment utilisé est le TCP (Transmission Control Protocol). Cette couche prend en charge le contrôle de flux et de la retransmission.
- La couche Session permet d'établir et coordonner les communications. Elle gère également les flux qui initient ou terminent une connexion.
- La couche Présentation est responsable de la mise en forme des données comme le cryptage, la compression (vidéo, sons...)
- La couche Application est la couche la plus élevée du modèle OSI. Cette dernière prend en charge les applications de l'utilisateur final. Elle gère également la qualité de service et l'authentification de l'utilisateur. Cette couche fournit des services d'application nécessaire par exemple pour les transferts de fichiers et les courriers électroniques.

Annexe 2 : Technologies et normes IEEE

L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) est une organisation internationale qui compose des équipes de chercheurs dans le domaine de l'informatique et des télécommunications pour promouvoir la connaissance dans le domaine de l'ingénierie électrique et électronique.

L'IEEE 802 est un comité de l'IEEE qui décrit une famille de normes relatives aux réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN) pour des transmissions de données par liaisons filaires ou sans fil.

L'IEEE 802 décrit les couches inférieures du modèle OSI à savoir la couche physique (PHY) et la couche liaison de données.

Plusieurs groupes de travail ont été constitués à partir du comité 802. Les thèmes d'étude se différencie d'un groupe à un autre. Ce qui a permis de définir les technologies dont nous présentons dans le tableau suivant.

Normes	Technologies
IEEE 802.15.1	Bluetooth
IEEE 802.15.4	WSN – ZigBee
IEEE 802.15.3a/4a	UWB
IEEE 802.11	Wi-Fi
IEEE 802.16	WiMAX

Annexe 3: Générations de la norme IEEE 802.11

Générations	Spécifications
IEEE 802.11a-1999	<ul style="list-style-type: none"> • Bande de fréquences : 5 GHz • Débit : 54 Mbits/s (théorique), 30 Mbits/s (réel) • Portée : 100 m
IEEE 802.11b-1999	<ul style="list-style-type: none"> • Bande de fréquence : 2.4 GHz • Débit: 11 Mbits/s (théorique), 6 Mbits/s (réel) • Portée : 300 m
IEEE 802.11d-2001	Spécifications pour le fonctionnement dans des domaines réglementaires supplémentaires.
IEEE 802.11g-2003	Amélioration de la couche PHY (Augmentation du débit) <ul style="list-style-type: none"> • Jusqu'à 54 Mbits/s (théorique), 30 Mbits/s (réel) • La plus utilisée
IEEE 802.11h-2003	Gestion du spectre et de la puissance d'émission dans la bande des 5 GHz en Europe.
IEEE 802.11i-2004	Amélioration de la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et l'authentification pour 802.11a, 802.11b et 802.11g.
IEEE 802.11j-2004	Fonctionnement dans la bande 4,9 GHz-5 GHz au Japon.
IEEE 802.11e-2005	Amélioration de la qualité de service du contrôle d'accès au support (MAC).
IEEE 802.11k-2008	Mesure des ressources radioélectriques des réseaux locaux sans fil.
IEEE 802.11y-2008	Fonctionnement à 3650-3700 MHz aux Etats-Unis.
IEEE 802.11w-2009	Gestion de la sécurité des trames.
IEEE 802.11n-2009	Amélioration du débit.
IEEE 802.11p-2010	Accès sans fil dans les environnements véhiculaires.
IEEE 802.11z -2010	Extension à la configuration de liaison directe (DLS).
IEEE 802.11v -2011	Gestion du réseau sans fil.
IEEE 802.11u-2011	Interfonctionnement avec les réseaux externes.
IEEE 802.11s-2011	Réseau maillé.
IEEE 802.11ae-2012	Priorité des trames de gestion.
IEEE 802.11aa-2012	Amélioration de la couche MAC pour la robustesse des vidéos en streaming.
IEEE 802.11ad-2012	Amélioration des débits dans la bande 60 GHz.
IEEE 802.11ac-2013	Amélioration des débits dans la bande en dessous de 6 GHz.
IEEE 802.11af-2013	Opération Espaces blancs de télévision (TVWS).
IEEE 802.11ai-2016	fonction de configuration de liaison initiale rapide (FILS) qui permet à un client LAN sans fil d'établir une liaison sécurisée en 100ms.

Annexe 4 : Caractérisation du coupleur

Les caractéristiques du coupleur JSO-10-471/3S - 180° Hybrid (schéma présenté dans la figure A.2) sont comme suit :

- Bande de fréquences: 1 – 4 GHz
- Atténuation: 1.8 dB
- Puissance d'entrée (Input) : 20 Watts
- Amplitude Balance : ± 0.5 dB max
- Phase Balance : $\pm 6^\circ$ max

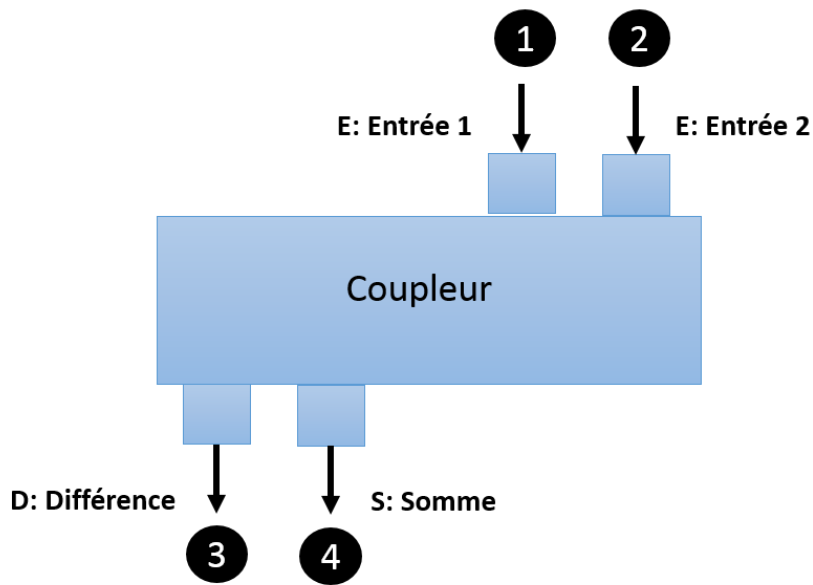


Figure A. 2: Schéma du coupleur JSO-10-471/3S [Jsoh10].

Le coupleur JSO-10-471/3S a été caractérisé dans le laboratoire à trois fréquences : 1 GHz, 2.4 GHz et 4 GHz.

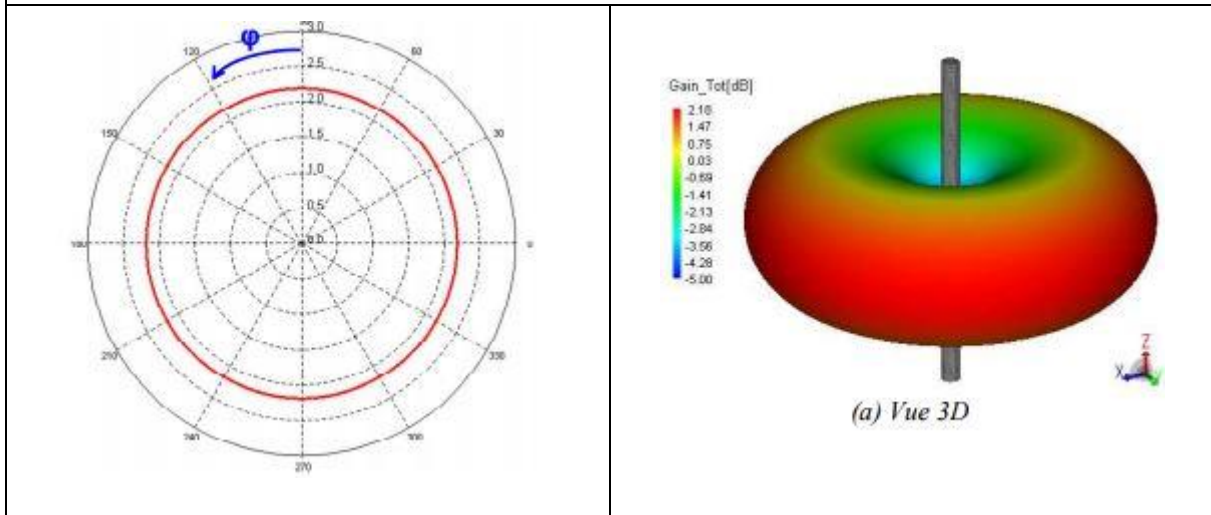
La matrice de ce coupleur a la forme suivante :

$$S = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \delta \\ \beta & \alpha & \delta & -\gamma \\ \gamma & \delta & \alpha & \beta \\ \delta & -\gamma & \beta & \alpha \end{pmatrix} \quad \text{avec :}$$

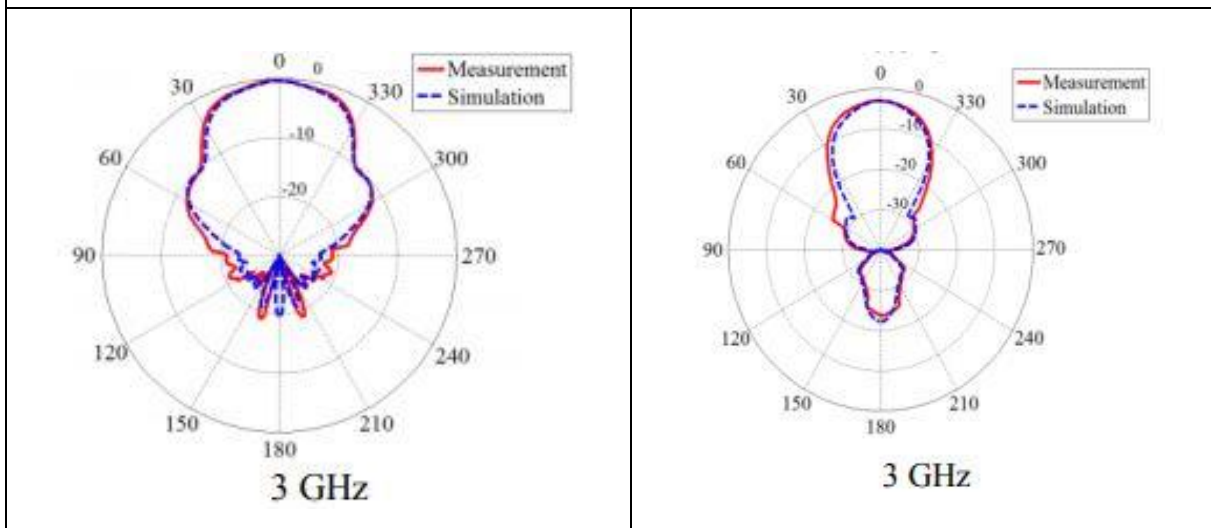
- $\alpha = -20$ dB
- $\beta = -40$ dB
- $\gamma = -4.4$ dB
- $\delta = -4.2$ dB

Annexe 5 : Diagramme de rayonnement des antennes étudiées

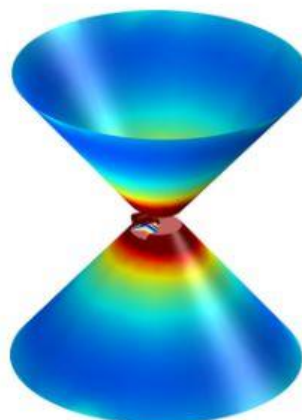
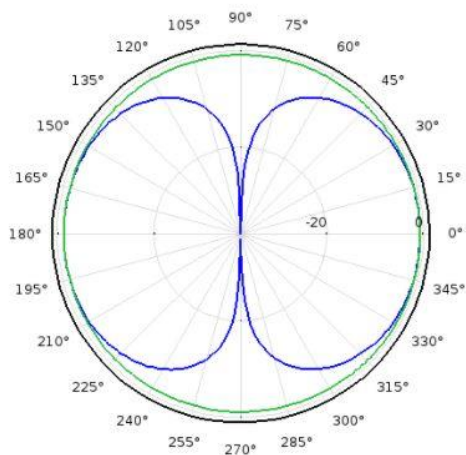
Antenne monopôle



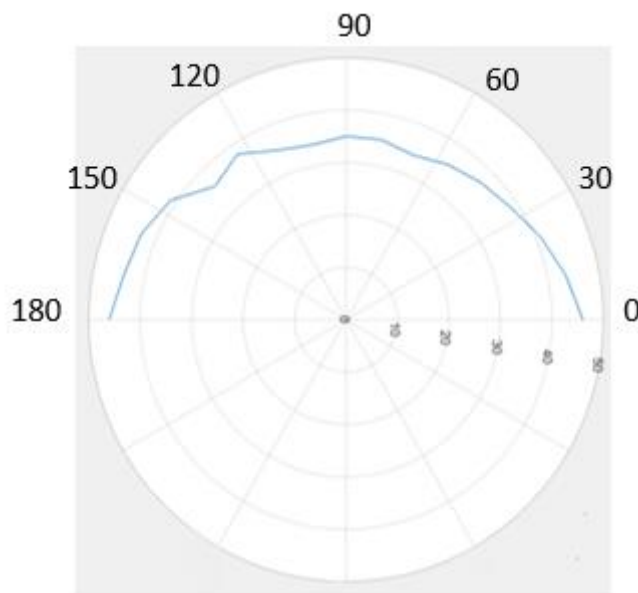
Antenne Horn (cornet double ridge)



Antenne biconique



Antenne 4-Patch



REFERENCES:

- [Ali02]: ZigBee Alliance, ZigBee specification, 2002.
- [Araf15]: <http://www.arafer.fr/observatoire-des-transport/analyses-sectorielles/secteur-ferroviaire/transport-de-marchandises> (vérifié le 05/2018).
- [Bans13]: A. Bansal et al., “RFID ZIGBEE Based Interplatform Train Tracking System”, Texas Instruments India Educators Conference (TIIEC), 2013, India.
- [Bara91]: S. Baranowski, M. Liénard and P. Degauque, "Beacon vehicle link in the 1-10 GHz frequency range", Proceedings of the DRIVE Conference On Advanced Telematics in Road Transport, Vol1, pp. 194-217, Bruxelles, 4-6 février 1991.
- [Bara99]: S. Baranowski, « Modélisation de la propagation d’ondes hyperfréquences en milieu confiné ou urbain », HDR, Université de Lille, 1999.
- [Berb01]: M. Berbineau, “Les systèmes de télécommunication existants ou émergents et leur utilisation dans le domaine des transports guidés”, Synthèse INRETS n°40, ISBN:2-85782-562-5, 2001.
- [Biao17]: U. Biaou, « Étude et mise en œuvre d'une plateforme hybride basée sur du sans fil pour l'efficacité énergétique et le contrôle d'accès dans le train », Mémoire de thèse, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2017.
- [Bico60] : Fiche technique, Antenne biconique, <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/KRS0460.pdf>
- [Brun06]: A. Le Brun, “Modélisation de Fonctions Élémentaires d’une Chaîne Radio pour des Liaisons Haut Débit”, Mémoire de thèse, Université de Limoges (France), 2006.
- [Boye11]: A. Boyer, Support de cours, http://www.alexandre-boyer.fr/alex/enseignement/cours_antennes_oct11_v4_5RT.pdf. Vérifié le 05/2018.
- [Chua87]: J. C-I Chuang, “The Effects of Time Delay Spread on Portable Radio Communications Channels with Digital Modulation”, I.E.E.E Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), vol.5, Issue 5, Juin 1987.
- [Coms17]: B. Cunningham, <https://www.comsol.com/blogs/enhancing-the-design-of-biconical-antennas-with-simulation/>. Vérifié le 05/2018.
- [Jsoh47] : Caractéristiques du coupleur, https://www.pulsarmicrowave.com/spec_sheets/JSO-10-471-3S.pdf
- [Corr11] : http://corridor.ifsttar.fr/final_workshop-fr.php, vérifié 04/2018.
- [Cost99]: COST Action 231, “Digital mobile radio towards future generation systems, final report,” tech. rep., European Communities, EUR 18957, 1999.
- [Darr15]: Livre “Physique et Théorie du Radar”, <http://radars-darricau.fr/livre/2-PDF/chapitre-05-2.pdf>
- [Data16]: Rapport Datalab, “Le transport ferroviaire de marchandises en 2015”, Octobre, 2016.

- [Dess11]:** D. Dessales, “Conception d’un Réseau de capteurs sans Fil, Faible Consommation, Dédié au Diagnostic in-situ des Performances des Bâtiments en Exploitation”, Rapport de thèse, Université de Poitiers (France), 2011.
- [Driv89]:** DRIVE V1002 SMILER, Short-range microwave links, present and future, Rapport WP3: "Evaluation of short range road vehicle links in the 1 to 10 GHz band", Final report, décembre 1989.
- [Fara08]:** S. Farahani, “ZigBee Wireless Networks and Transceivers”, Elsevier, 2008, ISBN: 978-0-7506-8393-7.
- [Fran13]:** M. Franceschinis et al., “Predictive monitoring of train wagons conditions using wireless network technologies”, 24th International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Bosnia-Herzegovina, 2013.
- [GaoL13]:** L. Gao, Y.D. Lan, "Transmission Distance Estimation and Testing for 2.4GHz ZigBee Applications", Fourth International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies (EIDWT), Chine, 2013.
- [Geof10]:** Rapport de synthèse, “GEOFENCE MD”, Programme ‘Système de Transport’ du pôle de compétitivité Lyon Urban Truck and Bus (LUTB), 2010.
- [Germ14]:** M. Germain, “Les réseaux de téléphonie mobile, Le GSM”, Forum ATENA 2014 – L’essentiel du GSM, 2014.
- [Grud09]:** M. Gruden et al., “Reliability experiments for wireless sensor networks in train environment”, European Wireless Technology Conference (EuWIT), Italie, 2009.
- [Grud14]:** M. Gruden et al., “Field operational testing for safety improvement of freight trains using wireless monitoring by sensor network”, IET Wireless Sensor Systems, Volume: 4, juin, 2014.
- [Hata80]:** M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service”, I.E.E.E Transactions on Vehicular Technology, VT-29,3, 1980, pp. 317-325.
- [Higu12]:** J. Higuera et al., “Experimental Study of Bluetooth, ZigBee and IEEE 802.15.4 Technologies on Board High-Speed Trains”, 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Japan, 2012.
- [Horn71]:** Fiche technique, Antenne Horn, http://www.ahsystems.com/datasheets/SAS-571_Horn_Antenna_Datasheet.pdf.
- [Ikeg91]:** F. Ikegami, T. Takeuchi, and S. Yoshida, “Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-39, 3, March 1991, pp. 299-302.
- [Koub05]:** A. Koubaa et al., “Technical Report, IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Network: A Technical Overview”, TR-050702, Version: 1.0, Juillet, 2005.
- [Kous16]:** M. R. Kousri, “Développement et évaluation d’un outil d’analyse dimensionné pour les problématiques de compatibilité électromagnétique propres au milieu ferroviaire”, Mémoire de thèse, Université de Lille (France), 2016.

[Leej07]: J. S. Lee et al., “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taiwan, 2007.

[Liuk08]: K. Liu et al., “Smart wireless railway monitoring system”, 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, UK, 2008.

[Lshu10]: Shucheng Liu et al., "Passive Interference Measurement in Wireless Sensor Networks, IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), Japan, 2010.

[Mala14]: B. Malakar et al., “Survey of RFID applications in railway industry”, First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES), India, 2014.

[Mana10]: T. Manabe et al., “Technologies for Railway Internet Services in Japan”, The 10 International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), Japan, 2010.

[Mara14]: Le Manuel de MARATHON, “The MARATHON 1500m Train Opening up new horizons in Rail Freight Transport in Europe”, ISBN: 978-2-9601435-1-5 2014.

[Mari92] : P. Mariage, “Etude théorique et expérimentale de la propagation des ondes hyperfréquences en milieu confiné ou urbain”, Mémoire de thèse, Université de Lille (France), 1992.

[Mehr14]: A. Mehrdadian, “Design and Implementation of 0.7 to 7 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna”, International Symposium on Telecommunication (IST), Iran, 2014.

[Mili14]: S. Mili, “Caractérisation de l’environnement électromagnétique transport pour la reconnaissance de conditions électromagnétique critiques”, Mémoire de thèse, Université de Lille (France), 2014.

[Nazi12] : A. Nazim, « Analyse des performances d’un réseau de capteurs exploitant le standard IEEE 802.15.4 », Mémoire de thèse, université de Grenoble, 2012.

[Norm54]: « IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks », IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011), Avril, 2016.

[Oppe05]: I. Oppermann et al., “UWB: Theory and Applications”, Ian Oppermann, Matti Hamalainen and Jari Iinatti, University of Oula, Finland, ISBN: 0-470-86917-8, 2004.

[Paga05]: P. Pagani, “Caractérisation et modélisation du canal de propagation radio en contexte Ultra Large Bande”, Mémoire de thèse, INSA de Rennes (France), 2005.

[Pain73]: J. H. Painter, S. C. Gupta, L. R. Wilson, “Multipath Modeling for Aeronautical Communications”, IEEE Transactions on Communications, Volume: 21, Issue: 5, Mai, 1973.

[Pskn1] : Fiche technique, Antenne PSKN, <https://www.mobilemark.com/download/specification-sheets/wifi/antenna-spec-117-pskn3-2400.pdf>.

[Pskn2] : Fiche technique, Antenne PSKN, <https://www.mobilemark.com/download/specification-sheets/gps-multi-band/PSKN3-2400.pdf>

[Rakj16]: S. M. Rakshit et al., “Wireless sensor networks in surface transportation”, 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), République tchèque, 2016.

[Refw1]: <http://tgveurofrance.com.pagesperso-orange.fr/wagons4.htm>

[Refw2]: <http://www.sncf.com/fr/fret/wagon-fret>

[Refw3]: <http://www.sncf.com/fr/presse/article/fret-marchandises-dangereuses-1120142>.

[Refw4]: https://i.ytimg.com/vi/gRPZxbpJF_E/maxresdefault.jpg

[Rome18]: G. Romeo, “Identification of the impact mechanisms of the electromagnetic interferences on the Wi-Fi communications”, Mémoire de thèse, Université de Lille (France), 2018.

[Rtsi12]: “Systèmes de transport intelligents”, Rapport sur les actions nationales envisagées pour la période 2012-2017, Article 17-2 de la directive 2010/40/UE, 2012.

[Ruit11]: Ruitao Xu et al. “MuZi: Multi-channel ZigBee Networks for Avoiding WiFi Interference”, IEEE International Conference on Internet of Things, and Cyber, Physical and Social Computing (iThings/CPSCoM), 2011, Chine.

[Schw]: <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/KRS0460.pdf> .

[Shre14]: P. L. Shrestha et al., “Performance analysis of adaptive clustering in Hybrid Technology Networking”, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Cyprus, 2014.

[Sing12]: Y. Singh, “Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 59– No.11, December 2012.

[Slim09]: M. N. Ben Slimen, “Recherche de procédures de caractérisation de l’environnement électromagnétique ferroviaire adaptés au contexte des systèmes de communication embarqués”, Thèse de doctorat, Université de Lille (France), 2009.

[Sust15]: Access Charge Final Report, “The Sustainable freight railway: Designing the freight vehicle- track system for higher delivered tonnage with improved availability at reduced cost”, 265740 FP7 - THEME [SST.2010.5.2-2.], WP5, 2015.

[Tayl06]: J.D. Taylor, “Ultrawideband Radar Applications and Design”, CRC Press, ISBN: 9781420089868, Mai, 2012.

[Terr12]: M. Terre et al., “Systèmes sans fil: problèmes résolus”, Hermes Science Publications, ISBN-13: 978-2746239067: ,2012.

[Tfue16]: Rapport spécial, “Le transport ferroviaire de marchandises dans l’UE: toujours pas sur la bonne voie”, ISBN : 978-92-872-4602-8, 2016.

- [Trin12]:** Rapport d'études, "Transports intelligents Mise en œuvre de la directive 2010/40, Eléments pour le choix d'actions publiques pour la période 2012-2017, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), 2012.
- [Viva04]:** <http://www.ahsystems.com/datasheets>, Vérifié 04/2018.
- [WaBe88]:** J. Waltisch and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-36, pp. 1788-1796, Décembre, 1988.
- [Xbee04]:** <https://www.digi.com/resources/documentation>, Vérifié 04/2018.
- [Xiao11]:** J. Xiao, "VoIP over WiMAX for railway freight dispatching telephone system, International Conference on e-Education, Entertainment and e-Management (ICEEE), Indonésie, 2011.
- [Xlvi15]:** X. Lv et al., "Modeling for train-ground communication channel based on WSN", The 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Chine, 2015.
- [Zhan11]:** H. Zhang, "Conception, caractérisation et réalisation de réseaux d'antennes fil-plaque, Application à la réalisation d'antennes pour terminaux WIMAX montés dans les trains.", mémoire de thèse, Université de Limoges (France), 2011.

Communications de l'auteur en relation avec les travaux de thèse

- Articles :

1. O. Cohin, **S. Iben Jellal**, F. Boukour, S. Baranowski, « Experimental Analysis of UWB Signal Performance in Constrained Environment for Railway Application », *Wireless Engineering and Technology*, ISSN Print: 2152-2294 ISSN Online: 2152-2308. October 2015.
2. U. Biao, **S. Iben Jellal**, M. Bocquet, S. Baranowski, « Study of rows of seats effects on indoor propagation at 2.4 GHz. », *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P), Volume-7, Issue-5, May 2017
3. **S. Iben Jellal**, U. Biao, L. Sakkila, Michael Bocquet, Sylvie Baranowski, Atika Rivenq, « Communication between Wagons: Propagation Channel and Architecture », *International Journal of Current Advanced Research*, Vol.6, issue 11, Nov 2017 pp. 7174-7179. DOI: <http://dx.doi.org/10.24327/ijcar.2017.7179.1094>.

- Conférences Internationales:

1. **S. Iben Jellal**, O. Cohin, S. Baranowski, U. Biao, M. Bocquet, A. Rivenq, "Experimental Analysis of Zigbee RF Signal Performance for Railway Application; Study on a Laboratory Reduced Scale Train", 4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT), Valenciennes, pages: 287-292, 20-22 Mai 2015.
2. **S. Iben Jellal**, S. Baranowski, U. Biao, M. Bocquet, A. Rivenq, "Communications Sans Fil des wagons à 2.4 GHz", 2016 Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb (CISTEM), Marrakech (Maroc), 26-28 Octobre 2016.
3. U. Biao, **S. Iben Jellal**, M. Bocquet, S. Baranowski, A. Rivenq, P. Mariage, "Study of the positioning of wireless sensors for communication at 2.4 GHz inside the train", IEEE International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), (pp. 1-5), Fes (Maroc), Avril 2017.
4. U. Biao, **S. Iben Jellal**, M. Bocquet, S. Baranowski, S. Leman, F. Hoeppe, "Hybrid model for fast EM simulation of wireless interferences in railway system", EMC Europe, 04-08 September 2017, Angers, Septembre 2017.
5. U. Biao , M. Bocquet, A. Rivenq , S. Iben Jellal, S. Baranowski, "Optimisation of Wireless Sensor Network Propagation for Energy Efficiency in Railway Vehicle" soumis à the 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) - Workshop WS-10 on "Railway RoSe: Wireless Robots and Sensors Networks for Railway Systems": IEEE Railway RoSe 2018. , September 9, 2018, Bologna, Italy.

- **Conférence nationale avec acte:**

1. **S. Iben Jellal**, U. Biaou, L. Sakkila, Michael Bocquet, Sylvie Baranowski, Atika Rivenq, « Communication sans fil à 2.4 GHz dans le milieu ferroviaire », Assemblée générale GDR ONDES, Interférences d'Ondes, Sophia Antipolis, Octobre 2017.

- **Communications / posters sans acte:**

1. **S. Iben Jellal**, O. Cohin, S. Baranowski, « Etude et développement d'une communication entre wagons par onde radio dans un environnement électromagnétique perturbé », Journée de recherche de l'ICAM, Lille, Novembre 2014 (Oral).

2. **S. Iben Jellal**, « Experimental Analysis of RF Signal Performance for Railway Applications » Journée de recherche de l'IEMN, Villeneuve d'Ascq, Novembre 2015 (Oral).

3. **S. Iben Jellal**, S. Baranowski, « Etude et développement d'une communication entre wagons par onde radio – Etat de l'art », Séminaire ARCUS, Val-Joly, Décembre 2015 (Oral).

4. **S. Iben Jellal**, S. Baranowski, « Développement d'une communication entre wagons par onde radio » Doctoriales, Marcq-en-Barœul, Mars, 2016 (Poster).

5. **S. Iben Jellal**, S. Baranowski, « Analyse Expérimentale des Performances du Signal RF pour les Applications Ferroviaires », Journée Thématique du GDR CNRS Soc SiP, IEMN, Valenciennes, Mars 2016 (Poster).

6. **S. Iben Jellal**, U. Biaou, L. Sakkila, Michael Bocquet, Sylvie Baranowski, « Propagation de l'onde à 2.4 GHz dans le milieu ferroviaire », Journées du club EEA 'Véhicule autonomes - Transport Intelligent', Valenciennes, Novembre, 2017 (Poster).

Résumé: Dans le domaine du transport de fret, il est nécessaire d'assurer le suivi des wagons, d'identifier les wagons sensibles (transport de matières dangereuses, denrées périssables...) ainsi que de collecter les informations associées (contenu, poids, localisation) pour faciliter la gestion logistique. Le but de cette thèse est de proposer un système de communication sans fil à courte portée qui répond à ces besoins. Les contraintes de l'environnement ferroviaire et de l'embarqué telles que la flexibilité, le coût de l'installation, la faible consommation d'énergie, et le risque de présence de perturbations électromagnétiques rend l'insertion des technologies sans fil dans le milieu ferroviaire plus complexe. Une étude comparative des systèmes de communication existants a permis d'identifier la technologie ZigBee comme étant la plus adaptée au problème étudié. Une comparaison des différents scénarios possibles du positionnement des dispositifs ZigBee a été réalisée. Des expérimentations en présence de véhicules et de conteneurs ont été effectuées. L'impact des perturbations électromagnétiques issues des installations d'alimentation ferroviaire et des émetteurs RF environnants, a été étudié. Une analyse d'autres types de perturbations générées intentionnellement pour nuire au système proposé à des fins malveillantes, a été également menée.

Mots clés : Réseaux de capteurs (technologie), Brouillage électromagnétique, Chemins de fer, Transports ferroviaires -- Marchandises, Onde électromagnétiques – Propagation, Propagation wagon-wagon, Propagation wagon-infrastructure...

Abstract: In railway freight transport, wagons tracking is necessary to identify sensitive elements (transport of hazardous materials, perishable goods ...) and the associated information (content, weight, location) could be useful for logistic management. The aim of this thesis is to propose a short-range wireless communication system, which meets these needs. The constraints of rail environment such as flexibility, technical installation difficulties, low energy consumption and the risk of electromagnetic disturbances, causes more difficulties to insert wireless technologies in railway environment. A comparative study of existing communication systems has identified the ZigBee technology as the most appropriate to design the communication between wagons and between wagon and infrastructure for the studied application. A comparison of different possibilities for positioning of ZigBee devices was carried out. Experimentations in presence of vehicles and containers have been realized. The impact of electromagnetic disturbances issued from rail power infrastructure and from surrounding RF transmitters, has been studied. Disturbances intentionally generated to damage the proposed system, have been also analyzed.

Keywords: Sensor networks (technology), Electromagnetic interference, Railroads, Rail transport – Goods, Electromagnetic waves – Propagation, Wagon-Wagon propagation, Wagon-Infrastructure propagation...