

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : ILIASSOU Addoh Al-Moubarak et DJIRE Mohamed Ben Yaya

Sujet

**Conception d'antenne miniature d'objets connectés pour application
au réseau LPWAN**

Soutenu publiquement, le 04/ 07/ 2021, devant le jury composé de :

Mme BELHADEF Yamina	MCA	Univ. Tlemcen	Présidente
M BOUKLI HACENE Nouredine	Professeur	Univ Tlemcen	Directeur de mémoire
M M'HAMEDI Mohammed	MAA	ESSA Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Mme BOUSALAH Faiza	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M MEGNAFI Hicham	MCA	ESSA Tlemcen	Invité

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de ses sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation et ma formation, que Dieu le garde et le protège.

À ma très chère mère

À ma mère exemplaire dans son amour maternel, elle qui m'a apporté en permanence de sa tendresse inégalable de la sécurité et ainsi que de la joie, je lui dédie ce mémoire en guise de mon immense reconnaissance.

À mes frères et sœurs

À ma chère sœur Mourzanatou, à mon frère Abdoul Hayou et à tous mes petit frères et sœurs je vous dédie ce travail pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite.

À ma famille

À toute ma famille (Addoh et Hamidou sangna) pour leurs patiences et leurs soutiens tout au long de mon parcours universitaire.

À mes amis

A la famille Coul-mal, la team belote en témoignage l'amitié qui nous a uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, sans oublier mon binôme Djire Mohamed Ben Yaya pour son humour et sa patience tout au long de ce travail.

ILIASSOU Addoh Al-Moubarak

Je dédie ce modeste travail :

A mon magnifique père, mon précieux offre de Dieu, Mr. Yaya Djire

A ma tendre et douce mère la femme qui a souffert sans me laisser
souffrir, Mme. Djire Oumou Diakite

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me
soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chers frères et sœurs ainsi qu'à toute ma famille.

A tous mes amis, et à l'ensemble des étudiants de la promotion master
de l'année 2020-2021

A mon pays le Mali

A ce beau pays l'Algérie, qui m'a accueilli les bras ouverts

A toute la communauté malienne et étrangère en Algérie sans oublier
mon binôme, Iliassou Addoh Al-Moubarak pour sa patience et sa
compréhension tout au long de ce projet.

DJIRE Mohamed Ben Yaya

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions « **DIEU** » **le Tout Puissant** de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour mener ce projet de fin d'études.

Nous exprimons notre immense gratitude et notre plus profond respect à notre encadreur et Co-encadreur **Mr. BOUKLI HACENE Noureddine** professeur à l'Université de Tlemcen et **Mr. M'HAMEDI Mohammed, MAA** à l'ESSA de Tlemcen, de nous avoir dirigé et guidé durant l'accomplissement de ce mémoire. Leur constante disponibilité, leurs conseils et remarques constructifs furent pour nous très précieux dans la réalisation de ce travail.

Tous nos remerciements à la présidente du jury **Mme BELHADEF Yamina, MCA** à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de présider ce jury.

Nous adressons nos sincères remerciements à **Mme BOUSALAH Faiza, MCB** à l'Université Tlemcen pour avoir pris le temps d'examiner et juger ce travail, ainsi au membre invité Mr. **MEGNAFI Hichem, MCA** à l'ESSA de Tlemcen.

Nous remercions également nos chères familles pour leur soutien, leur engagement et leur amour inconditionnel.

A tous nos proches, amis, à l'ensemble de nos professeurs, nous disons, merci d'avoir contribué à notre éducation grâce à vous, nous sommes à même de relever les défis de la société et de notre secteur d'activité.

Résumé

La tendance technologique actuelle est orientée vers le développement des réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Network), au service de nouveaux besoins par exemple, de l'amélioration du bien-être à domicile, la supervision à distance des villes (ville intelligentes), d'application médicales et agricultures développées etc. De tels objets, dont les dimensions sont souvent limitées à quelques centimètres, doivent être généralement à fonctionnement sans fil, et de faible consommation d'énergie, ce qui impose au concepteur d'allouer une importance particulière à l'étude et l'optimisation de la partie radio.

Ce sujet de fin d'étude porte, par conséquent, sur la conception d'une topologie d'antenne pour intégration aux objets connectés utilisée dans les réseaux LPWAN.

Mots-clés : Antenne miniature, multi-bandes, ville intelligentes, communication sans fil, multistandards, objet connecté, LPWAN, SigFox, Lora, Antenne PIFA, antenne Monopole.

Abstract

The current technological trend is oriented towards the development of LPWAN networks (Low Power Wide Area Network), serving new needs for example, the improvement of well-being at home, remote supervision of cities (smart cities), medical application and agriculture development etc. Such objects, whose dimensions are often limited to a few centimeters, must generally be of wireless operation, and of low energy consumption, which requires the designer to allocate particular importance to the study and optimization of the radio part.

This end-of-study topic therefore focuses on the design of an antenna topology for integration with connected objects used in LPWAN networks.

Keywords: Miniature antenna, multi-band, smart city, wireless communication, multistandard, connected object, LPWAN, SigFox, Lora, PIFA antenna, Monopoly antenna

ملخص

الاتجاه التكنولوجي الحالي موجه نحو تطوير شبكات LPWAN (شبكة المنطقة الواسعة منخفضة الطاقة)، لتلبية الاحتياجات الجديدة، على سبيل المثال، تحسين الرفاهية في المنزل، والإشراف عن بعد على المدن الذكية، والتطبيقات الطبية والزراعية المتطورة الخ. يجب أن يكون الشيء متصل، التي غالبًا ما تكون أبعاده محدودة ببضعة سنتيمترات، تعمل لاسلكيًا، وذات استهلاك منخفض للطاقة، مما يتطلب من المصمم تخصيص أهمية خاصة لدراسة الجزء الراديوي وتحسينه.

يركز موضوع نهاية الدراسة هذا على تصميم طوبولوجيا الهوائي للتكامل مع الأشياء المتصلة المستخدمة في شبكات LPWAN

الكلمات الرئيسية: هوائي مصغر، متعدد النطاقات، مدينة ذكية، اتصال لاسلكي، شئ متصل، LPWAN، SigFox، Lora، هوائي PIFA، هوائي أحادي القطب.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I Etat de l'art sur les réseaux LPWAN</i>	3
I.1. Introduction	4
I.2. Introduction sur les technologies des objets connectés.....	4
I.2.1 Courte distance (RFID, Bluetooth, WIFI...)	5
I.2.1.1 RFID (Radio-Frequency Identification)	5
I.2.1.2 Bluetooth.....	6
I.2.1.3 WIFI.....	7
I.2.2 Longue distance	8
I.2.2.1 Réseaux LPWAN cellulaire	8
I.2.2.2 Réseaux LPWAN non cellulaire	9
I.3. Généralité sur le réseau LPWAN	9
I.3.1 Caractéristiques du réseau LPWAN	10
I.3.1.1 La portée	11
I.3.1.2 La consommation.....	12
I.3.1.3 Les coûts	13
I.3.1.4 L'évolutivité.....	14
I.4. Etude des caractéristiques des différents standards du réseau LPWAN	15
I.4.1 LoRaWAN.....	16
I.4.1.1 La couche physique de LoRa.....	16
I.4.1.2 La couche liaison des données de LoRa : LoRaWAN.....	19
I.4.2 SigFox.....	20
I.5. Conclusion.....	24

Chapitre II Etude des antennes planaire pour objets connectée LPWAN	25
II.1. Introduction.....	26
II.2. Etude des antennes imprimées	26
II.2.1. Antennes imprimées	26
II.2.2. Caractéristiques généraux des antennes	27
II.2.2.1. La directivité.....	27
II.2.2.2. Coefficient de réflexion	27
II.2.2.3. Impédance d'entrée de l'antenne.....	28
II.2.2.4. Rendement de l'antenne	29
II.2.2.5. Le gain	29
II.2.3. Technique d'alimentation.....	29
II.2.3.1. Alimentation par ligne micro ruban.....	29
II.2.3.2. Alimentation par câble coaxiale	30
II.2.3.3. Alimentation couplée par ouverture	30
II.2.3.4. Alimentation couplée par proximité.....	30
II.3. Etude des antennes PIFA (Planar Inverted-F Antenna).....	32
II.3.1. Les antennes miniatures	32
II.3.1.1. Effet de miniaturisation sur les paramètres de l'antenne.....	32
II.3.1.1.1. Directivité.....	32
II.3.1.1.2. Efficacités de rayonnement	33
II.3.1.1.3. Facteur de qualité de l'antenne.....	35
II.3.1.1.4. Impédance d'entrée et correspondance	34
II.3.1.2. Les techniques de miniaturisation	35
II.3.1.2.1. Techniques pour antennes à bande étroite.....	35
II.3.1.2.2. Techniques pour antennes ULB (Ultra large bande).....	36
II.3.2. Les antennes PIFA	38
II.3.2.1.1. Structure d'une antenne PIFA	39
II.3.2.2. Caractéristiques radioélectriques d'antenne PIFA	39

II.3.2.2.1. Distribution de champ électrique	39
II.3.2.2.2. Distribution du courant.....	40
II.3.2.2.3. L'effet des paramètres de substrat.....	40
II.3.2.3. Avantages et inconvénients d'une antenne PIFA.....	40
II.4. Etude des antennes pour objet connecté du réseaux LPWAN.....	41
II.4.1. Etude de caractéristique des antennes pour les réseaux LPWAN	41
II.4.1.1. Typologie d'antenne	41
II.4.1.2. Caractéristiques radioélectriques des antennes LPWAN	42
II.4.1.2.1. Bande passante et fréquence de travail	42
II.4.1.2.2. Gain et rendement	43
II.5. Conclusion	44
<i>Chapitre III Conception et miniaturisation des antennes PIFA</i>	<i>45</i>
III.1. Introduction	46
III.2. Antenne PIFA fonctionnant à la fréquence du standard LoRa 868Mhz.....	46
III.2.1. Méthodologie de la conception	46
III.2.1.1. Modèle proposé	47
III.2.1.2. Configuration et études paramétriques de l'antenne	47
III.2.1.2.1. Les dimensions de l'antenne	48
III.2.1.2.2. Effet du positionnement du point d'alimentation	48
III.2.1.2.3. Effet de l'espace air	49
III.2.2. Présentation et analyse des résultats de simulation.....	50
III.2.2.1. Coefficient de réflexion.....	50
III.2.2.2. Diagramme de rayonnement et gain.....	50
III.3. Miniaturisation de l'antenne PIFA fonctionnant à la fréquence 868Mhz	51
III.3.1. Première topologie	52
III.3.1.1. Méthodologie de la conception	52
III.3.1.1.1. Modèle proposé.....	52
III.3.1.1.2. Configuration des paramètres de l'antenne.....	53

III.3.1.2. Présentation et analyse des résultats de simulation.....	54
III.3.1.2.1. Coefficient de réflexion	54
III.3.1.2.2. Diagramme de rayonnement et gain	54
III.3.2. Deuxième Topologie.....	56
III.3.2.1. Méthodologie de la conception	56
III.3.2.1.1. Modèle proposé.....	56
III.3.2.1.2. Configuration des paramètres de l'antenne.....	57
III.3.2.2. Présentation et analyse des résultats de simulation.....	58
III.3.2.2.1. Coefficient de réflexion	58
III.3.2.2.2. Diagramme de rayonnement et gain	58
III.3.2.3. Validation des résultats.....	59
III.4. Conclusion	62
Conclusion général	64
<i>Références bibliographiques</i>	<i>i</i>
<i>Annexes</i>	<i>v</i>

Liste des figures

Figure I.1 - Illustration d'un système RFID [1].....	5
Figure I.2 - spectre électromagnétique des radiofréquences [2]	6
Figure I.3 - Logo du standard WPAN IEEE 802.15 Bluetooth [3].....	6
Figure I.4 - Logo du standard WLAN IEEE 802.11 Wifi.....	7
Figure I.5 - Applications IoT activées par LPWAN	10
Figure I.6 - les couches de LoRa et de LoRaWAN.....	16
Figure I.7- Variation de fréquence effectuée par LoRa [20].....	17
Figure I.8 - Schéma de modulation LoRa [10].....	18
Figure I.9 - Architecture du réseau LoRaWAN	20
Figure I.10 - Les Classes des terminaux LoRaWAN	20
Figure I.11 - Technologie Sigfox UNB.....	21
Figure I.12 - Modulation D-BPSK.....	22
Figure I.13 - Réception des messages par plusieurs stations de base Sigfox.....	22
Figure I.14 - Architecture de haut niveau du réseau Sigfox.....	23
Figure I.15 - Combinaison des spécificités de la technologie Sigfox	24
Figure II.1 - Structure d'une antenne en technologie imprimée.	27
Figure II.2 - Schéma équivalent du dispositif à l'émission.....	28
Figure II.3 - Variation des champs de courant.	29
Figure II.4 - Diverses techniques d'alimentation.	31
Figure II.5 - Antenne monopole.....	34
Figure II.6 - Illustration de deux exemples de miniaturisation utilisant la technique du passage d'une structure 3D à une structure 2D [38]	37
Figure II.7 - Exemples sur les techniques de modification de la transition entre la ligne de transmission et l'élément rayonnant	38
Figure II.8 - Structure d'une antenne PIFA [39].....	39
Figure II.9 - Antenne PIFA pour objet connecté.....	42
Figure II.10 - Schéma de l'antenne hélicoïdale protégée par un châssis plastique [3]	42

Figure II.11 - antenne monopole miniature sur PCB	42
Figure III.1 - Structure de l'antenne sur le rédacteur de CST studio.....	47
Figure III.2 - Effet de la variation du point d'alimentation xfeed sur la fréquence de résonance.....	49
Figure III.3 – Effet de la variation de l'espace air (h_{air}) sur la fréquence de résonance.....	49
Figure III.4 - Le coefficient de réflexion S11 en dB	50
Figure III.5 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire (a) xz ($\phi=0^\circ$), (b) yz ($\phi=90^\circ$), (c) xy ($\theta=90^\circ$)	51
Figure III.6 - Diagramme de rayonnement en 3D	51
Figure III.7 - Topologie de l'antenne miniaturisé à 30% sur CST.....	52
Figure III.8 - Le coefficient de réflexion S11 en dB de l'antenne miniaturisé à 30%.	54
Figure III.9 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire de l'antenne miniaturisé à 30% (a) xz ($\phi=0^\circ$), (b) yz ($\phi=90^\circ$), (c) xy ($\theta=90^\circ$).....	55
Figure III.10 - Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 30%.....	55
Figure III.11 – Topologie de l'antenne miniaturisé à 50% sur CST.....	56
Figure III.12 - Le coefficient de réflexion S11 en dB de l'antenne miniaturisé à 50%.....	58
Figure III.13 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire de l'antenne miniaturisé à 50% (a) xz ($\phi=0^\circ$), (b) yz ($\phi=90^\circ$), (c) xy ($\theta=90^\circ$).....	59
Figure III.14 - Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 50%.....	59
Figure III.15 - Comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne obtenu avec CST et HFSS.....	60
Figure III.16a - Diagramme de rayonnement pour xz $\phi=0^\circ$ (a) CST (b) HFSS.....	61
Figure III.16b - Diagramme de rayonnement pour yz $\phi=90^\circ$ (a) CST (b) HFSS.....	61
Figure III.16c - Diagramme de rayonnement pour xy ($\theta=90^\circ$) (a) CST (b) HFSS.....	62
Figure III.17 - Diagramme de rayonnement du gain en 3D (a) CST (b) HFSS.....	62

Liste des tableaux

Tableau I-1 - Classes des appareils certifiés Bluetooth [3].	7
Tableau II-1- Caractéristiques de diverses techniques d'alimentation	31
Tableau III-1 - Dimensions paramétrique de l'antenne.	48
Tableau III-2 - Dimension paramétrique de l'antenne miniaturisé à 30%	53
Tableau III-3- Dimension paramétrique de l'antenne miniaturisé à 50%	57

Liste des abréviations

AEP : Antenne Electriquement Petite
API : Application programming Interface
BSS : Business Support System
BW : Bandwidth
CDMA : Code Division Multiple Access
CEPT : Conférence européenne des administrations des Postes et Télécommunications
CF : Carrier Frequency
CR : Coding Rate
CSS : Chirp Spread Spectrum
CST : Computer Simulation Technology) Microwave Studio.
DBPSK : Differential Binary Phase-shift Keying
DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum
ETSI : Eropcan Telecommunications Standards institute
FCC : Federal Communications commission
FEM : Finite Element Method
FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum
FIT : Finite Integration Technique
GFSK : Gaussian Frequency Shift Keying
GSM : Global System for Mobile communications ou Groupe Spécial Mobile
HFSS : High Frequency Structure Simulator
IBSS : Independent Basic Service Set
IdO : l'Internet des objets
IoT : Internet of Things
ISM : Industrial, Scientific and Medical
ISM : Industriel Scientifique et Médical
LAN : Local Area Network
LoRa : Long Range
LoRaWAN : Long Range Wide Area Network
LPWAN : Low Power Wide Area Network
LTCC : 'Low Temperature Co-fired Ceramic

LTE : Long Terme Evolution-Advanced
LTE-M : Long Terme Evolution-Advanced for Machines
M2M : Machine to Machine
MAC : Media Access Control
MFSK : Multiple Fréquence-Shift Keying
MSA MicroSrip Antenna
Nb-IoT : (Narrow Band IoT)
NF : Noise Figure
OSS : Operations Support Systeme
PCB : Printed Circuit Board
PEC : Perfect Electric Conductor
PIFA : Planar Inverted-F Antenna
RFID : Radio Frequency Identification
SF : Spreading Factor
SNR : Signal to Noise Radio
ULB : Ultra large bande
UMTS : Universal Mobile Telecommunications System
UNB : Ultra Narrow Band
VPN : Virtual Private Network
Wifi : Wireless Fidelity
WPAN : Wireless personnel area network
2D : Deux Dimensions
3D : Trois Dimensions

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, nous assistons à des changements majeurs dans le domaine des télécommunications, qu'il s'agisse des téléphones mobiles, des réseaux filaires ou sans fil. Les progrès des technologies de l'information, des communications, de la microélectronique et des télécommunications ont conduit au déploiement à grande échelle de nouveaux réseaux qui relient aujourd'hui un grand nombre d'individus et d'entités informatiques. Ces réseaux sont la colonne vertébrale de tous les services affectant à la fois les domaines personnels et professionnels, avec un accès quasi instantané à l'information, aux réseaux sociaux et au monde informatique.

À ce sujet, les antennes déployées dans le nouveau système de télécommunications doivent pouvoir s'adapter à cet environnement en croissance exponentiel. En effet, l'émergence de nouveaux standards de télécommunications tels que l'Internet des Objets (IoT) qui a reçu de plus en plus d'attention et a commencé à entreprendre des tâches importantes. Leurs améliorations nécessitent également que les équipements soient plus efficaces dans leur fonctionnement. Beaucoup de ces appareils ont des exigences particulières, qui peuvent être une transmission à longue distance, à faible débit de données et des exigences de faible puissance. Pour ceux-ci, la transmission telle que le WIFI ne peut pas être envisagée. Les technologies de communication cellulaire telles que la 3G ou la 4G peuvent fournir de telles distances, mais en retour, ces appareils consommeront plus d'énergie. Afin de résoudre ces deux problèmes, il existe une alternative de communication émergente : Réseau étendu à faible consommation LPWAN (Low Power Wide Area Network). Dans le LPWAN, il existe plusieurs protocoles de communication, dont, SigFox et LoRaWAN [7].

De nos jours, le LPWAN devient de plus en plus populaire parmi les industries et les chercheurs en raison de sa large couverture et de son faible coût. LoRa est l'une des technologies les plus adaptées aux objets connectés qui nécessite une autonomie maximale et une distance de transmission d'informations longue portée.

Cependant, les antennes des objets LPWAN aussi diversifiées qu'elles peuvent être, elles ont toutes les caractéristiques d'encombrement. Donc il est souhaitable qu'elles soient réduites pour mieux les intégrer aux petits objets. Pour cette raison, des techniques de miniaturisation sont utilisées pour résoudre les problèmes de taille, de surface et de fréquence de résonance.

Les équations de Maxwell sont résolues sous leurs formes intégrale ou différentielle pour étudier les problèmes électromagnétiques de rayonnement et de propagation des antennes. La conception des antennes nécessite une étape de simulation numérique. À cette fin, des logiciels ont été conçus, tels que CST studio, ANSYS HFSS [annexes], etc., qui peuvent résoudre les équations de Maxwell et permettre la conception et la simulation d'antennes. Nous utiliserons le logiciel CST et HFSS pendant notre travail.

Notre travail s'articule autour de trois chapitres distincts :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les réseaux étendus à faible puissance LPWAN. Dans la première partie du chapitre nous avons fait un rappel sur les technologies répandue dans le monde des objets connectés tout en détaillant leurs caractéristiques. Puis nous nous sommes intéressés aux différents standards LPWAN les plus connues, notamment LoRaWAN et SigFox en présentant leurs caractéristiques et leurs fonctionnements.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude théorique des antennes planaires appliquée aux objets connectés, donc il serait intéressant de rappeler les caractéristiques généraux des antennes, faire des études sur les antennes PIFA, discuter sur les antennes miniatures et les effets de miniaturisation sur les caractéristiques d'une antenne et enfin pour clôturer le chapitre il serait judicieux de faire une analyse sur les antennes des objets LPWAN sans omettre l'étude sur leurs caractéristiques radioélectriques.

Le troisième chapitre est orienté vers la conception, la simulation, et la miniaturisation de plusieurs antennes en commençant par une antenne PIFA $\lambda/4$ de LoRaWAN fonctionnant à la fréquence 868MHz à l'aide du logiciel CST, ensuite nous allons miniaturiser cette antenne jusqu'à atteindre 50% de miniaturisation sur éléments rayonnant en utilisant plusieurs techniques de miniaturisation. Par la fin nous nous attarderons sur l'interprétation des résultats de simulation et aussi sur la validation de ces résultats qui se fera avec le logiciel HFSS.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce manuscrit, tout en mettant en évidence les résultats obtenus. De plus, certaines approches de recherche seront proposées pour de futurs travaux.

Chapitre I

Etat de l'art sur les réseaux LPWAN

I.1. Introduction

Avec l'émergence de l'Internet des objets IdO ou IoT (Internet of Things) et des communications machine à machine M2M (Machine to Machine), une croissance massive du déploiement des nœuds de capteurs est attendue prochainement. L'enquête IoT prévoit plus de 75 milliards d'objets connectés d'ici 2025.

Par conséquent, pour soutenir de telles exigences, une technologie de l'IoT, appelé réseau à grande échelle et de faible puissance LPWAN (Low Power Wide Area Network), a évolué considérablement. LPWAN est une classe de normes et de solutions de communication sans fil avec des caractéristiques telles que des grandes zones de couverture, des faibles taux de données de transmission avec des paquets de petites tailles et une bonne autonomie de la batterie, ce qui représente une solution idéale aux objets connectés.

Les réseaux LPWAN se reposent sur le contexte des technologies traditionnelles répandues dans le paysage de l'IoT, comme les réseaux sans fil à courte portée (RFID, Bluetooth, WIFI) et les réseaux à longue portée (GSM, UMTS, LTE). Les technologies sans fil non cellulaires existantes ne sont pas idéales pour connecter les appareils de faible puissance répartis sur de vastes zones géographiques. La portée de ces technologies est limitée à quelques centaines de mètres au mieux. Les appareils ne peuvent donc pas être déployés arbitrairement ou déplacés n'importe où, ce qui exige de nombreuses applications pour les différents secteurs d'activités des réseaux LPWAN. Quant aux réseaux cellulaires, ils assurent une bonne couverture adaptée à la communication de type M2M, mais n'atteignent pas une efficacité énergétique suffisante pour une longue durée de vie de la batterie.

Dans ce premier chapitre, nous introduisons les généralités sur les technologies des objets connectés, en suite nous nous attarderons sur les caractéristiques du réseaux LPWAN et aussi des standards LPWAN les plus connus.

I.2. Introduction sur les technologies des objets connectés.

Aujourd'hui, devenue une partie intégrante de notre quotidien, l'utilité des objets connectés est indispensable pour le côté pratique et technologique. Il est cependant un appareil disposant des capteurs échangeant de l'information via un réseau selon les technologies comme Bluetooth, WIFI, LPWAN...

En générale ces capteurs communiquent à travers internet d'où la notion de l'Internet des objets IdO. Cette connexion à l'Internet va permettre l'accès à distance aux données d'un

capteur. Par la suite nous allons énumérer quelques technologies longue portée et courte portée pour application aux IoT.

I.2.1 Courte distance (RFID, Bluetooth, WIFI...)

Pour l'émission et la réception des informations, certains objets n'ont besoin que d'une technologie à faible distance par connexion ou par contact physique entre l'émetteur et le récepteur, nous pouvons citer par exemple les technologies comme RFID, Bluetooth, WIFI...

I.2.1.1 RFID (Radio-Frequency Identification)

- **Présentation**

La technologie RFID (Radio Frequency Identification) est en plein développement. Equipée d'un émetteur fixe ou mobile, d'un récepteur sous forme d'antenne et d'une étiquette appelée tag composé d'une ou plusieurs puces et d'une antenne. Ce type de communication par onde radio permet de faire un sondage quasi instantané de plusieurs puces [1]. Ainsi on a accès à une identification d'un objet, de sa localisation, de ces caractéristiques et on peut même suivre son cheminement.

On les retrouve dans [1]:

- Le suivi des colis.
- L'identification d'animaux.
- la gestion d'une bibliothèque.

- **Les composants d'un système RFID**

Un système complet utilisant la technologie RFID est composé des éléments suivants [1]:

- Un transpondeur.
- Une antenne.
- Un lecteur.
- Un logiciel RFID.

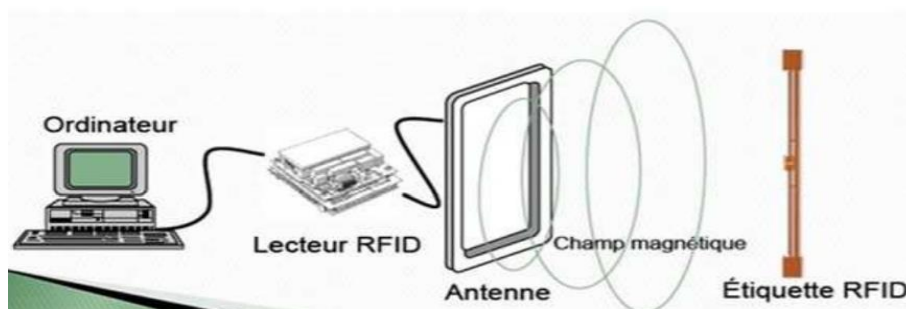


Figure I.1 - Illustration d'un système RFID [1]

- **Fréquence de fonctionnement**

La communication entre le tag et son lecteur se fait sur des plages de fréquences différentes et en fonction de trois paramètres importants : la distance entre le lecteur et l'étiquette, les normalisations internationales et les lieux d'utilisations (hôpitaux, usines, centrales nucléaires, etc...). Dans la partie haute de la Figure I.2, une représentation générale des différentes bandes radiofréquences dont celle utilisée ou utilisable en RFID. [2]

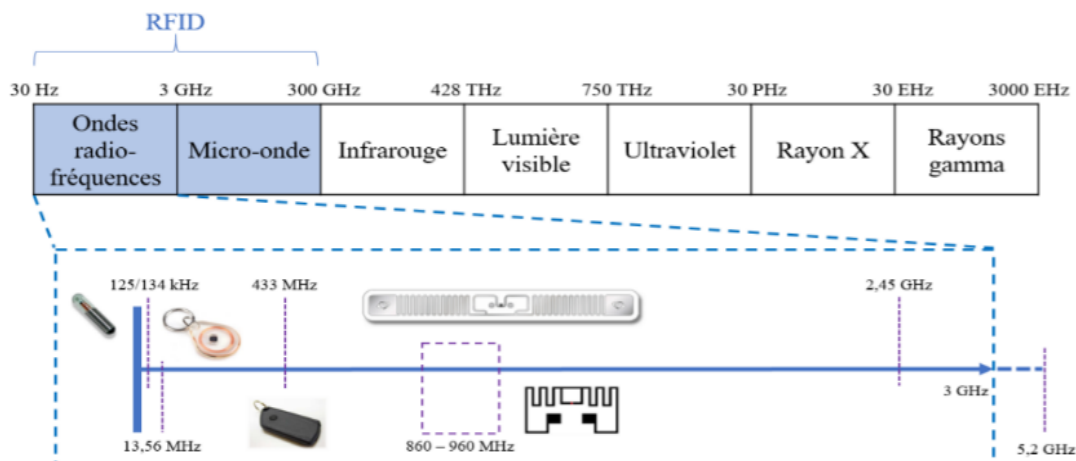


Figure I.2 - spectre électromagnétique des radiofréquences [2]

I.2.1.2 Bluetooth

- **Présentation**

Le Bluetooth est une technologie du réseau WPAN (Wireless personnel area network) qui est un réseau sans fil à courte portée utilisant les ondes radio comme support de transmission. Les principaux avantages de la technologie Bluetooth sont sa fiabilité, sa faible consommation en énergie, son faible coût.



Figure I.3 - Logo du standard WPAN IEEE 802.15 Bluetooth [3]

Cette technologie est aujourd'hui largement répandue dans le monde. Elle occupe notamment les téléphones portables, ordinateurs portables, périphériques informatiques (claviers, souris), casques audio, oreillettes mains-libres, autoradios, appareils photo numériques, bornes publicitaires [3].

- **Fonctionnement**

Bluetooth utilise le spectre de fréquence 2,4 GHz avec une portée allant de 10 à 100 m selon le terminal utilisé (tableau I.1) son débit maximal atteint de nos jours 24 Mbps. Le système utilise le principe d'étalement de spectre par saut de fréquence FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum ou encore appelé étalement de spectre par évansion de fréquence), elle consiste à diviser la bande de fréquence 2,4 – 2,4835 GHz en 79 canaux d'une largeur de bande de 1MHz.

Classe	Puissance maximal	Portée maximal
1	100 mW(20 dBm)	100 m
2	2,5 mW(4 dBm)	10 m
3	1 mW(0 dBm)	1 à 3 m

Tableau I-1 - Classes des appareils certifiés Bluetooth [3].

I.2.1.3 WIFI

- **Présentation**

L'accroissement exponentiel des besoins en communications sans fil et l'explosion du trafic internet grand public ont poussé l'industrie et la recherche à imaginer une solution de connexion entre les réseaux fixes et les appareils nomades. Le standard Wireless LAN IEEE 802.11 (Local Area Network) (figure I.4) a été créé pour répondre à cette problématique et assurer l'interopérabilité de ces appareils communicants. L'idée était de décliner une version sans-fil du célèbre IEEE 802.3 plus connu sous le nom d'Ethernet. Le Wifi (Wireless Fidelity) offre des connexions entre appareils mobiles sur de courtes distances, typiquement de l'ordre de quelques dizaines de mètres [3].



Figure I.4 – Logo du standard WLAN IEEE 802.11 Wifi

Le Wifi 6, aussi appelé Wifi AX, nouvelle génération en cours de commercialisation, va permettre d'améliorer considérablement la connectivité des objets connectés. Avec un débit

de 10 Gb/s, il permettra de gérer beaucoup plus d'appareils plus efficacement tout en consommant moins d'énergie : il s'agit de limiter le mode veille des objets en les réveillant lorsqu'un échange de données est nécessaire [4].

- **Fonctionnement**

On distingue sous la couche MAC deux types de réseaux : le réseau de type infrastructure et le réseau de type Ad Hoc.

- Dans les réseaux de type Infrastructure, Tous les appareils du réseau sont connectés à un même point d'accès qui gère les connexions.
- Dans le réseau de type Ad Hoc chaque périphérique communique directement avec les périphériques situés à sa portée, sans passer par un intermédiaire. Ce mode est pratique pour l'échange de données entre quelques stations en l'absence d'une quelconque infrastructure réseau (aucun point d'accès). Le réseau ainsi constitué s'appelle Independent Basic Service Set (IBSS) [5].

I.2.2 Longue distance

Dans le contexte très avancé de l'internet des objets (IoT), l'une des avancées majeures des technologies de communication des objets connectés concerne l'arrivée des technologies de communication longue portée [6]. On parlera ici des réseaux LPWAN cellulaire et des LPWAN non cellulaire.

I.2.2.1 Réseaux LPWAN cellulaire

Le réseau cellulaire classique peut être une possibilité lorsqu'il y a de grandes quantités de données à transférer, mais la question de l'alimentation en énergie peut se poser. Pour résoudre cette problématique, différentes solutions à basse consommation ont été adaptées pour mieux répondre aux besoins des capteurs [7].

Ce sont les technologies Nb-IoT (Narrow Band IoT) et LTE-M (ou LTE Cat-M1) qui partent du principe que les réseaux cellulaires sont déjà largement déployés et offrent une vaste couverture exploitable. Elles bénéficient de fréquences réservées et offrent un panel de possibilités de débits (plus large pour LTE-M, plus restreint pour Nb-IoT), de quelques bits par seconde à 1 Mbps, avec une communication bidirectionnelle et des portées allant de quelques dizaines ou centaines de mètres en zone urbaine à plusieurs kilomètres en zone rurale [7].

I.2.2.2 Réseaux LPWAN non cellulaire

Il existe d'autres technologies de LPWAN, ne faisant pas recours aux réseaux cellulaires. Dont la plus connue, SigFox d'origine française qui offre une communication bidirectionnelle avec un très faible débit.

En exploitant la technologie UNB (Ultra Narrow Band) et des fréquences basses ne nécessitant pas de licence (à l'inverse des réseaux cellulaires dont les fréquences sont soumises à des licences d'exploitation), allant de 433 MHz en Asie à 868 MHz en Europe et 915 MHz aux États-Unis [25], ce qui permet de transférer de petites quantités de données sur de plus longues distances (jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres en fonction du terrain). Nous avons aussi la technologie LoRaWAN (LoRa pour Long Range) qui utilise aussi des fréquences sans licence et permet une communication bidirectionnelle à bas débit avec une modulation CSS (Chirp Spread Spectrum) répétant le message sur plusieurs fréquences pour réduire le risque d'interférence.

La portée va de quelques kilomètres en zone urbaine à une quinzaine de kilomètres en zone rurale avec un débit maximum de 22 Kbps, avec une possibilité de modulation entre débit et portée selon les besoins [7].

I.3. Généralité sur le réseau LPWAN

Outres des appareils ayant besoin d'échanger de plus en plus des quantités énormes d'informations via les réseaux cellulaires, l'Internet des objets est en plein essor et utilise notamment des objets connectés sous forme de capteur et d'élément communicant.

L'idée primaire consistait à faire véhiculer ces informations sur les réseaux cellulaires, mais avec des contraintes de coûts et de consommation d'énergie qui sont à priori non compatibles à une communication d'un grand nombre de capteurs. Ainsi pour répondre à ces besoins spécifiques du M2M, les réseaux LPWAN constituent des alternatives économiques et peu gourmands en énergie, permettant de faire fonctionner des capteurs pendant des semaines, des mois, voire des années. La Figure I.5 représente les différents secteurs d'activités où la technologie LPWAN est présente, ces secteurs d'activités incluent, entre autres.

- **Villes Intelligentes**

Stationnement intelligent, santé structurelle des bâtiments, ponts et monuments historiques, mesure de la qualité de l'air, mesure du niveau sonore du bruit, congestion

routière et contrôle des feux de circulation, contrôle des péages routiers, éclairage intelligent, optimisation de la collecte des ordures, gestion des déchets, compteurs d'utilité, détection des incendies, surveillance et contrôle des ascenseurs, équipement de construction et surveillance de la santé du travail, gestion de l'environnement et sécurité publique.

- **Smart Environnement**

La qualité de l'eau, la réduction de la pollution atmosphérique, la réduction de la température climatique, les incendies de forêt, les glissements de terrain, le suivi des animaux, la surveillance du niveau de neige et la détection précoce des tremblements de terre.

- **Smart Agriculture et Fermes**

Mesure de la température, de l'humidité et de l'alcalinité, amélioration de la qualité du vin, serres intelligentes, automatisation agricole et robotique, réseau de stations météorologiques, compost, culture hydroponique, surveillance et suivi du bétail et niveaux de gaz toxiques.

- **Réseau intelligent et Energie**

Contrôle du réseau, équilibrage de la charge, surveillance et mesure à distance, et surveillance des moulins à vent et de l'installation d'énergie solaire.

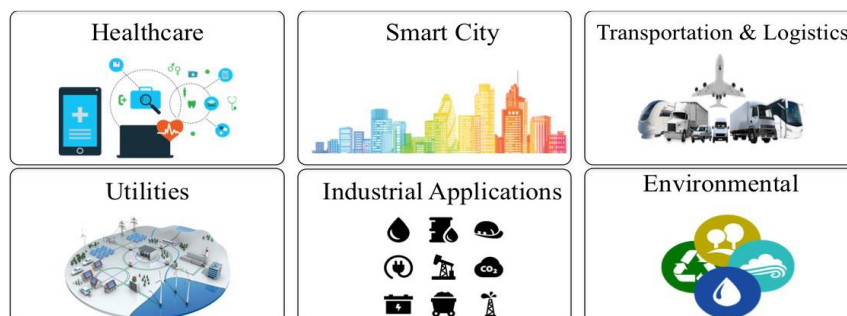


Figure I.5 - Applications IoT activées par LPWAN

I.3.1 Caractéristiques du réseau LPWAN

Comme évoquer antérieurement, l'objectif principal des technologies LPWAN est d'offrir une connectivité à faible consommation à un nombre considérable de terminaux, répandue sur des grandes zones géographiques et à faible coût. Cette partie énumère les techniques utilisées et décrit les différentes caractéristiques des technologies LPWAN.

I.3.1.1 La portée

Le principe des technologies LPWAN est de couvrir une large zone et permettre une bonne propagation du signal vers des endroits intérieurs difficiles d'accès tel que les sous-sols. Le plan quantitatif vise à un Gain de + 20 dB par rapport aux systèmes cellulaires existants [8].

Pour atteindre ces longues portées tout en respectant les puissances d'émission autorisées, l'idée est de transmettre plus de puissance pour chaque bit de données. Le débit est donc limité [9].

- **Utilisation de fréquence en dessous de 1 GHz**

La plupart des technologies LPWAN utilisent des fréquences porteuses inférieures à 1GHz, qui offre une communication robuste et fiable. La bande sous 1 GHz est moins encombrée que 2,4 GHz utilisée par la plupart des technologies sans fil. Ainsi les signaux à basse fréquence subissent moins d'atténuations et d'évanouissement par trajets multiples causés par des obstacles [8]

- **Technique de modulation**

La technologie LPWAN est conçus pour atteindre un budget de liaison de 150 ± 10 dB qui permet une portée de quelques dizaines de kilomètres. La couche physique conditionne un débit de donnée élevé et ralentit le taux de la modulation afin de mettre plus d'énergie dans chaque bit (ou symbole). Pour cette raison, les récepteurs peuvent décoder correctement les signaux fortement atténués. Il y a deux types de techniques de modulation adaptées aux technologies LPWAN : La technique à bande étroite et par étalement de spectre [8] [10].

–*Bande étroite*

Cette technique de modulation permet d'attribuer à chaque porteuse une bande étroite pour partager plus efficacement le spectre global entre plusieurs liaisons. Le niveau de bruit ressenti dans une bande étroite est minime, par conséquent le signal du récepteur n'a pas besoin d'un dés-étalement de fréquence, ce qui permet une conception simple et peu coûteuse de l'émetteur-récepteur [10]. Quelques technologies LPWAN compressent chaque signal de la porteuse par une bande ultra étroite d'une largeur aussi courte que 100 Hz (par exemple, dans SigFox), réduisant davantage le bruit expérimenté et augmentant le nombre de terminaux pris en charge par unité de bande passante. Cependant, le débit de données effectif

de chaque terminal diminue. Ce faible débit de données, associé aux réglementations de spectre relatif au partage des bandes inférieure à 1 GHz, peut limiter la taille maximale et la fréquence de transmission des paquets de données [8].

–Étalement de spectre

Cette technique permet d'étaler un signal à bande étroite sur une bande de fréquence plus large mais avec la même densité de puissance. Le signal transmis est de type bruit difficile à détecter par un intrus, plus résistant aux interférences et aux attaques par brouillage. Toutefois, il faut plus de gain de traitement du côté du récepteur pour décoder le signal généralement reçu en dessous du bruit de fond. La diffusion d'un signal à bande étroite sur une large bande entraîne une utilisation moins efficace du spectre mais l'utilisation de plusieurs séquences orthogonales peut résoudre ce problème, tant que, les utilisateurs utilisent des canaux et des séquences orthogonales différents; ils peuvent tous être décodés simultanément, ce qui augmente la capacité globale du réseau. Il y a deux types de techniques d'étalement du spectre utilisés par les normes existantes comme LoRa. Le spectre d'étalement de propagation « CSS » et le spectre d'étalement par séquence directe « DSSS » [8].

I.3.1.2 La consommation

On s'attend à ce que les appareils IoT fonctionnent pendant très longtemps (plusieurs années) sans avoir besoin de remplacer la batterie. Les réseaux LPWANs réalisent un fonctionnement de faible puissance à l'aide de plusieurs paramètres.

- **La topologie**

Bien que, la topologie en maille ait été largement utilisée pour étendre la couverture des réseaux sans fil à courte portée, leur coût de déploiement élevé est un inconvénient majeur dans la connexion d'un grand nombre d'appareils géographiquement distribués. En outre, comme le trafic est transmis sur plusieurs sauts vers une passerelle, certains nœuds sont plus encombrés que d'autres en fonction de leur emplacement ou les modèles de trafic réseau. Par conséquent, ils épuisent leurs batteries rapidement, limitant la durée de vie globale du réseau à seulement quelques années voire même quelques mois [11][12].

D'autre part, une très longue gamme de technologie LPWAN surmonte ces limitations en connectant directement les terminaux aux stations de base, ce qui évite la nécessité de

déployer des relais et des passerelles denses et coûteux. La topologie qui en résulte est une topologie étoile qui est largement utilisée dans les réseaux cellulaires et apporte d'énormes avantages d'économie d'énergie. Contrairement à la topologie en maille, les appareils n'ont pas besoin de gaspiller de l'énergie précieuse dans l'écoute d'autres appareils qui veulent relayer leur trafic à travers eux. Une station de base toujours en service offre un accès pratique et rapide lorsque les terminaux l'exigent. En plus de la topologie étoile, quelques technologies LPWAN soutiennent les topologies d'arbres et de mailles, mais avec une complexité supplémentaire dans la conception du protocole [8].

- **Cycle de service**

Le fonctionnement à basse puissance est réalisé en éteignant de façon opportuniste les composants gourmands en énergie des appareils M2M/IoT [13] par exemple, transmetteur de données. Le cycle de service radio permet aux appareils LPWAN d'éteindre leurs transmetteurs, lorsqu'ils ne sont pas nécessaires. Ce n'est que lorsque les données doivent être transmises ou reçues que le transmetteur est allumé.

Ainsi le cycle de service du transmetteur de données n'est pas seulement un mécanisme d'économie d'énergie, mais aussi une exigence législative. La réglementation régionale sur le partage du spectre peut limiter le temps qu'un seul émetteur peut occuper pour assurer sa coexistence avec d'autres appareils partageant le même canal.

- **Protocole d'accès au medium simplifié**

Les réseaux cellulaires et les réseaux sans fils à courte portée utilisent largement les protocoles MAC mais ce n'est pas le cas pour les technologies LPWAN. En effet, les réseaux cellulaires synchronisent les stations de base et les terminaux avec précision pour bénéficier des schémas MAC complexes qui exploitent la diversité de fréquence et de temps. Contrairement aux technologies LPWAN, il est difficile d'obtenir une synchronisation très stable requise par ces systèmes avec des terminaux ultra bas coût dotés d'oscillateurs peu coûteux et de faible qualité [10].

I.3.1.3 Les coûts

Le succès commercial des réseaux LPWAN est lié à la connexion d'un grand nombre d'objets connectés, tout en maintenant le coût du matériel très basse. Cette accessibilité permet aux technologies LPWAN non seulement de répondre à un large éventail d'applications, mais aussi de rivaliser favorablement avec les autres technologies déjà en place. Cette conception à faible coût des terminaux a été rendue possible grâce à plusieurs

techniques, c'est ainsi que nous avons déjà abordé certains de ces techniques précédemment mais d'autres techniques seront énumérées dans la suite du travail.

- **Réduction de la complexité des matérielles**

Contrairement aux technologies cellulaires et sans fil à courte portée, les récepteurs LPWAN doivent traiter des formes d'ondes moins complexes. Ils leur permettent de réduire les débits des données et la tailles de mémoire, en minimisant la complexité matérielle et donc le coût [15].

- **Infrastructure minimale**

Les technologies traditionnelles sans fil et câblées souffrent d'une portée limitée, nécessitant un déploiement dense et donc coûteux de l'infrastructure (passerelles, lignes électriques, nœuds relais, etc.). Toutefois, une seule station de base LPWAN relie des dizaines de milliers d'objets connectés répartis sur plusieurs kilomètres, réduisant considérablement les coûts pour les opérateurs du réseau.

I.3.1.4 L'évolutivité

La prise en charge d'un grand nombre d'appareils envoyant de faibles volumes de trafic est l'une des principales exigences pour les technologies LPWAN. Ces technologies devraient bien fonctionner avec un nombre croissant et des densités d'appareils connectés. Plusieurs techniques sont considérées pour faire face à ce problème d'évolutivité.

- **Techniques de diversité**

Pour accueillir autant d'appareils connectés que possible, une exploitation efficace de la diversité dans le canal, le temps, l'espace et le matériel est essentielle. En raison de la faible puissance et de la nature peu coûteuse des terminaux, une grande partie de ceci est réalisée par la coopération des composants plus puissants [15]. Par conséquent, le réseau devrait fournir une sorte de qualité de service par rapport à la même technologie sous-jacente LPWAN. Pour les normes cellulaires où les ressources radio sous-jacentes peuvent être partagées entre LPWAN et les applications mobiles à large bande, des mécanismes devraient être définis pour la coexistence de différents types de trafic. Au meilleur de notre connaissance, les technologies LPWAN actuelles offrent une qualité de service limitée [14].

- **La densité**

Les réseaux LPWAN et les réseaux cellulaires traditionnels utilisent un déploiement dense de passerelles pour faire face à l'augmentation de la densité des terminaux dans certaines zones. Le problème est cependant, de le faire sans interférence entre les terminaux et les passerelles. De nouvelles approches de densification pour les réseaux LPWAN nécessitent des recherches plus approfondies car les techniques cellulaires existantes reposent sur une gestion bien coordonnée des ressources radio au sein et entre les cellules, hypothèse qui n'est pas vraie pour la plupart des technologies LPWAN [15].

- **La sélection de canal adaptatif et débit de données**

L'optimisation des liaisons pour une communication fiable et énergétique dans les réseaux LPWAN dépendent de plusieurs techniques : L'adaptation des schémas de modulation, sélection des meilleurs canaux pour assurer la portée ou faire un contrôle de puissance de transmission adaptatif qui nécessitent une surveillance efficace des qualités de la liaison et une coordination entre les terminaux et le réseau [15].

La possibilité d'une sélection et d'une modulation adaptative des canaux dépend de chaque technologie LPWAN. Dans le cas où la passerelle ne peut pas fournir des informations en retour sur la qualité de la communication sur la liaison montante, ces derniers utilisent un mécanisme très simple pour améliorer la qualité de la liaison : la transmission répétée du même paquet plusieurs fois, souvent sur plusieurs canaux sélectionnés au hasard, dans l'espoir qu'au moins une copie parvienne à la passerelle avec succès. Ces mécanismes permettent d'améliorer la fiabilité de la liaison montante tout en maintenant la complexité et le coût des terminaux très bas. Dans les cas où une communication en liaison descendante peut permettre l'adaptation de paramètres de liaison montante, les passerelles ou le cœur du réseau peuvent jouer un rôle essentiel dans la sélection de paramètres tels que le canal ou le débit optimal pour améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique [15].

I.4. Etude des caractéristiques des différents standards du réseau LPWAN

Aujourd'hui déjà, il existe un grand nombre de fournisseurs LPWAN qui s'installent sur le marché. Les technologies les plus connues sont actuellement SigFox et LoRaWAN. Les

origines et les caractéristiques de ces deux technologies seront brièvement présentées dans cette section.

I.4.1 LoRaWAN

La technologie LoRaWAN est promue et développée par LoRaWAN Alliance, qui a été fondée par l'entreprise Semtech. L'Alliance s'est donnée pour mission de définir une norme ouverte pour LoRaWAN et compte désormais plus de 400 membres. Il s'agit notamment de producteurs connus (IBM, Cisco...) [19].

Il est important de faire la distinction entre LoRaWAN et LoRa parce qu'il ne s'agit pas de termes interchangeables. LoRa est une technologie de modulation à étalement de spectre inventée en 2010 et développée en 2012 par Cycleo et commercialisée par le fabricant américain Semtech. Il s'agit d'une technologie qui module les signaux dans la bande ISM (Industrielle, Scientifique et Médicale) sous 1 GHz ainsi, elle utilise en Europe une bande de fréquence de 868 MHz et 915 MHz aux États-Unis [16], tandis que LoRaWAN est une définition du protocole MAC qui prend en charge la faible puissance, la longue portée et la capacité élevée dans les réseaux LPWAN. En général, la norme de communication et l'architecture du système déterminent les performances techniques globales de la technologie, telles que l'efficacité énergétique pour économiser la charge de la batterie des terminaux, la capacité du réseau et les taux de données dédiés pour différentes applications qui peuvent être pris en charge par le réseau. La couche physique et la couche MAC de cette technologie sont indiquées dans la figure I.6 [17] [18] et leur fonctionnement seront bien illustrés par la suite.

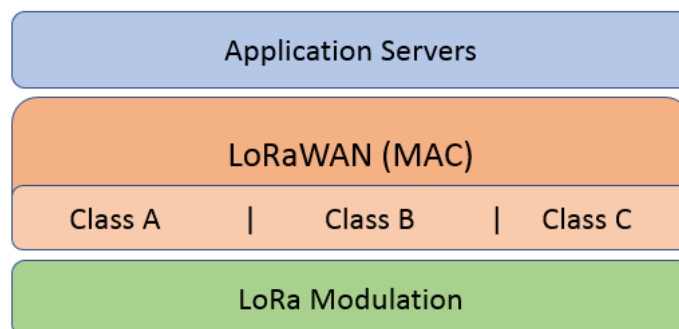


Figure I.6 - les couches de LoRa et de LoRaWAN

I.4.1.1 La couche physique de LoRa

La caractéristique clé de la norme LoRaWAN est LoRa qui fait partie de la couche physique et décrit la modulation qui maintient la capacité à long terme dans LoRaWAN.

L'évolution de la fréquence d'un tel signal est strictement croissant « UpChirp » ou décroissante « DownChirp » et linéaire au cours du temps. L'information est transmise par

des déplacements de fréquence, on peut donc faire le rapprochement entre LoRa et une modulation par déplacement de fréquence multiple « MFSK » (Multiple Fréquence-Shift Keying). Comme il y a un étalement de spectre, cela rend la transmission très résistante aux interférences et aux effets de trajets multiples. La fréquence est généralement étendue sur une bande passante de 125 kHz à 500 kHz [20] [10].

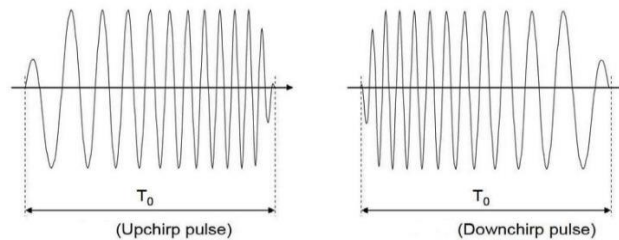


Figure I.7 - Variation de fréquence effectuée par LoRa [20].

- **Caractéristiques de la modulation LoRa**

La modulation LoRa est constituée de plusieurs paramètres de configuration à savoir la fréquence porteuse CF (Carrier Frequency), le facteur d'étalement SF (Spreading Factor), la bande passante B (Bandwidth) et le taux de codage CR (Coding Rate).

- *La fréquence Porteuse CF*

C'est la fréquence centrale utilisée lors de la transmission. Pour l'émetteur-récepteur LoRa, CF est comprise entre 863 et 870 MHz en Europe [23].

- *Le facteur d'étalement SF*

Dans LoRa, la fréquence de départ d'un Chirp est utilisée pour représenter un symbole avec un nombre de bits codés qui est ajustable, appelé facteur d'étalement SF. Cela signifie qu'un Chirp utilise un SF représente $2SF$ bits par symbole et un symbole est représenté par plusieurs Chips [20]. Un Chip représente en fait des impulsions d'un code à spectre étalé, tel qu'une séquence de code de pseudo-bruit « PN » (Pseudo-Noise). L'équation 1.1 donne le lien entre le SF, le Chip et le symbole [10].

$$SF = \frac{\text{chiprate}}{\text{symbolrate}} \quad (I.1)$$

- *La bande passante B*

Elle représente la plage de fréquences dans la bande de transmission. B ne peut être choisi que parmi trois options : 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz. Si une transmission rapide est requise, une valeur de 500 kHz est préférable. Cependant,

si une longue portée est nécessaire pour l'application, une valeur de 125 kHz doit être préférée.

Comme nous l'avons expliqué plus tôt, la modulation LoRa utilise l'étalement de spectre pour transmettre ses informations, mais au lieu d'utiliser des codes d'étalement CDMA (Code Division Multiple Access), elle utilise une méthode appelée CSS (Chirp Spread Spectrum). La finalité est toujours la même : avoir plusieurs transmissions dans le même canal. La conséquence sur le spectre est aussi la même : cela provoque un étalement du spectre [21]. La modulation CSS permet de répartir l'énergie du signal sur une bande plus large en se basant sur un SF. Etant une largeur de bande de fréquences du signal B, le SF permet de déterminer la durée du symbole T_s comme suit selon l'équation suivante [10].

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B} \tag{I.2}$$

La transmission de messages plus longue augmente la probabilité de collisions. La sensibilité du récepteur S est calculée comme suit :

$$S[dBm] = -174 + 10 \log(B) + NF + SNR \tag{I.3}$$

Où (-174) représente le bruit thermique du récepteur dans une bande passante de 1Hz, NF est le facteur de bruit du récepteur (qui est fixé pour une donnée de configuration matérielle) et SNR est le rapport signal sur bruit requis pour la modulation [22].

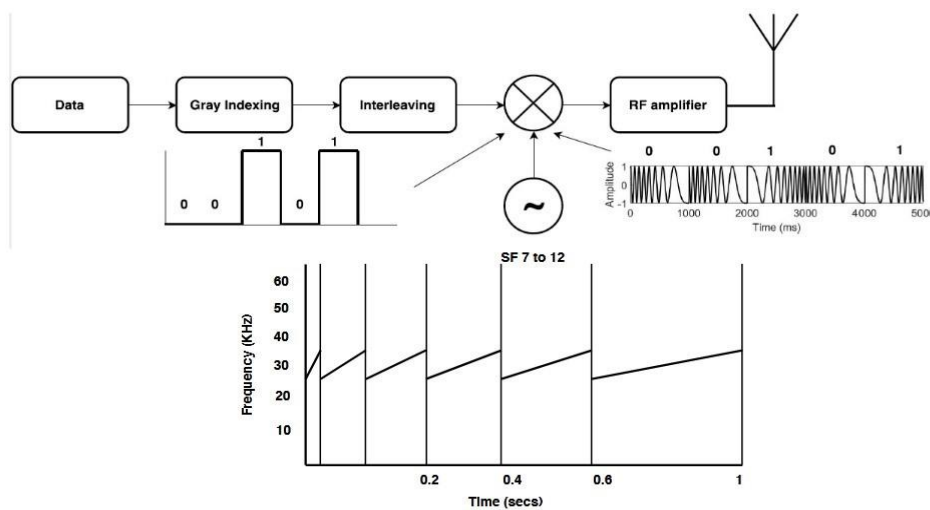


Figure I.8 - Schéma de modulation LoRa [10].

I.4.1.2 La couche liaison des données de LoRa : LoRaWAN

Le réseau LoRaWAN est décrit comme une architecture d'étoiles à longue portée. Contrairement à l'architecture de maille où les données sont transmises d'un nœud à l'autre pour atteindre la destination à longue portée et à grande taille cellulaire, l'architecture LoRaWAN augmente la capacité du réseau, réduit la complexité et augmente par conséquent l'efficacité énergétique des nœuds en éliminant l'adhérent supplémentaire de données entre les nœuds.

- **Les composants du réseau LoRaWAN**

Il est composé de quatre composants qui sont entre autres :

- **Equipements (End-devices)**

Les terminaux représentent la partie périphérique du réseau LoRaWAN tels que des capteurs ou des outils de contrôle. Les équipements se connectent généralement à plus d'une passerelle activement et leur envoient les mêmes données simultanément.

- **Concentrateurs ou passerelle (Gateways)**

Les passerelles sont connectées aux équipements et aux serveurs via des connexions cellulaires, Ethernet ou Wi-Fi.

- **Serveur Réseau**

Les serveurs gérés par le cloud au sein du réseau où toutes les opérations sont effectuées, c'est-à-dire la suppression des paquets de données dupliqués, la mise en œuvre du contrôle de sécurité, la transmission des accusés de réception si nécessaire par la passerelle la plus proche et le déploiement du taux de données adaptatif, etc.

- **Serveurs d'application**

Les serveur d'applications qui contrôle la fonction des équipements et recueille des informations auprès d'eux, telles que des informations sur l'humidité si des capteurs d'humidité sont utilisés par exemple.

Comme le montre la figure I.9 [17], les terminaux envoient des données à plusieurs passerelles, en utilisant le protocole LoRa, qui à son tour vers le serveur basé sur le cloud via Ethernet ou le réseau cellulaire. L'utilisateur obtient les informations sur son terminal à partir du serveur à l'aide d'applications conçues à cet effet.

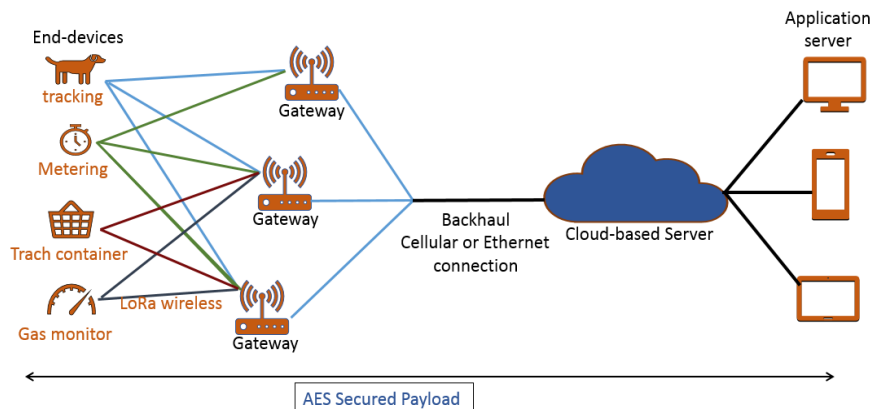


Figure I.9 - Architecture du réseau LoRaWAN

• **Classes d'appareils**

LoRaWAN distingue trois classes d'appareils différentes: terminal de classe A, B et C (figure I.10) [10]. Ceux-ci sont utilisés pour optimiser les cas d'utilisation finale. Les classes d'appareils respectives pèsent sur le temps de communication de la liaison descendante du réseau avec la durée de vie de la batterie.

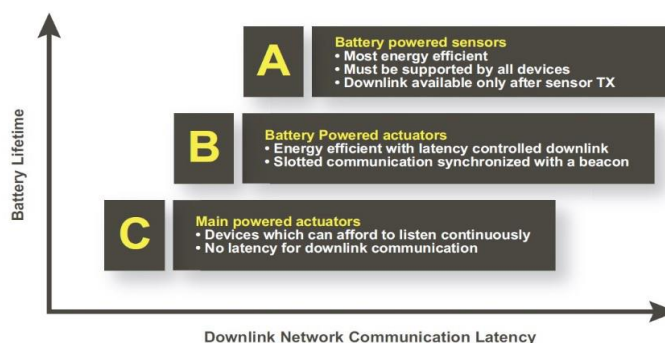


Figure I.10 - Les Classes des terminaux LoRaWAN

I.4.2 SigFox

Sigfox est une technologie créée en 2009 par la société française Eponyme et dont le siège social est situé près de Toulouse, en France.

Grâce à son réseau LPWAN mondial et à son riche écosystème de partenaires experts, Sigfox fournit des services de communication clé en main, bidirectionnels et sécurisés pour révéler le véritable potentiel de l'Internet des objets.

Sigfox définit une façon standardisée de collecte des données à partir de capteurs et d'objets avec un ensemble unique et normalisé d'interfaces de programmation d'applications (API). En outre, la technologie innovante de Sigfox complète le « machine-to-machine » cellulaire

traditionnel grâce à la mise en place de solutions globales et offrant une longue autonomie énergétique au coût le plus bas [25].

Sigfox est, en tant que connectivité secondaire, une solution très prometteuse pour atteindre une consommation énergétique très réduite et améliorer l'expérience des utilisateurs. Sigfox fournit le réseau, la technologie et crée l'écosystème indispensables pour aider les entreprises et les organisations à atteindre leurs objectifs en matière d'IoT [25].

Par la suite nous allons présenter des paramètres fondamentaux de la technologie Sigfox pour comprendre son positionnement et ses avantages compétitifs.

- **Bande ultra-étroite UNB (Ultra Narrow Band)**

Sigfox utilise 192 KHz de la bande non licenciée ISM pour échanger des messages par liaison radio. La technique d'émission est ce que l'on appelle la bande ultra-étroite. Chaque message occupe 100 Hz dans les zones ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ou 600 Hz dans les zones FCC (Federal Communications Commission) et est transféré à un débit de 100 ou 600 bits par seconde selon la région [25].

Cette technologie permet aux stations de base Sigfox des communications sur de longues distances sans être affectées par le bruit.

La bande utilisée varie en fonction des zones géographiques : dans les pays suivant les normes ETSI, la bande utilisée est comprise entre 868 et 868,2 MHz et dans le reste du monde, la bande utilisée est comprise entre 902 et 928 MHz, et des restrictions sont applicables selon la réglementation locale [25].

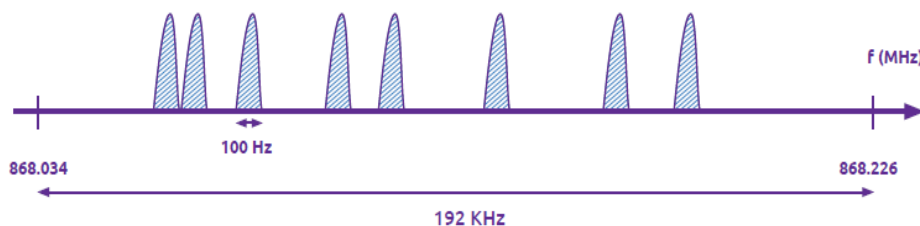


Figure I.11 - Technologie Sigfox UNB

- **Modulation utilisée**

Pour les transmissions des périphériques vers les stations de base (uplinks), Sigfox utilise la modulation différentielle de verrouillage binaire de phase-décalage DBPSK (Differential Binary Phase-shift Keying). Pour les transmissions de liaison

descendante (qui sont moins fréquentes), la technique gaussienne de décalage de fréquence GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) est utilisée [26].

Pour encoder des 0 et 1, la modulation de phase est utilisée. La particularité du D-BPSK vient du fait que pour encoder un 0, un changement de phase intervient alors que ce n'est pas le cas pour encoder un 1 comme illustré dans la figure I.15 [27].

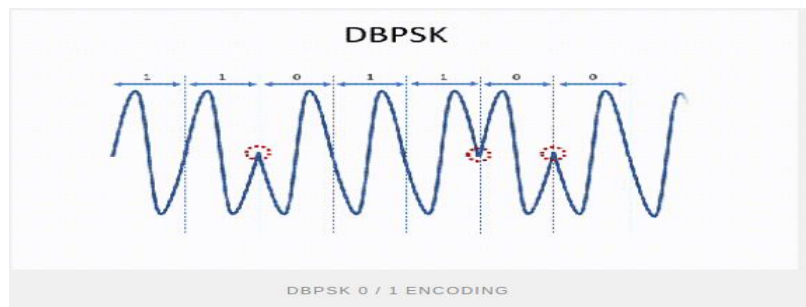


Figure I.12 - Modulation D-BPSK

- **Réception coopérative**

Le principe de la réception coopérative est que, contrairement aux protocoles cellulaires, les objets ne sont pas attachés à une station de base spécifique. Le message envoyé est reçu par n'importe quelle station de base à proximité. [25].

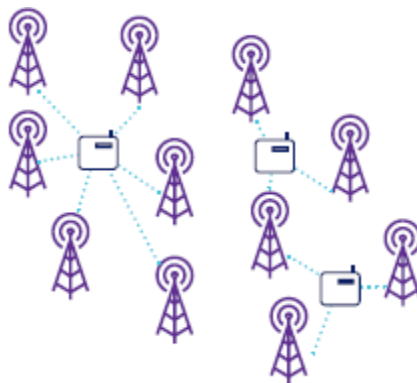


Figure I.13 - Réception des messages par plusieurs stations de base Sigfox

La diversité spatiale, associée à la diversité temporelle et fréquentielle des répétitions, sont des facteurs déterminants de la grande qualité de service du réseau Sigfox [25].

- **Communication bidirectionnelle**

Le message descendant est déclenché par l'objet. Une fois qu'il a émis son message, l'objet retourne en veille pendant 20s puis se réactive pendant 25s pour recevoir le message

descendant émis par la station de base. La fréquence descendante est la fréquence du premier message montant plus un delta défini [25].

- **Vue d'ensemble sur l'architecture du réseau :**

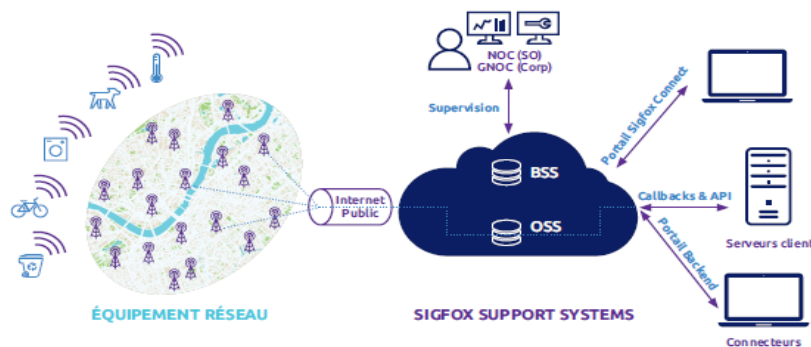


Figure I.14 - Architecture de haut niveau du réseau Sigfox

L'architecture du réseau Sigfox est horizontale, légère et composée de deux parties principales. La partie de l'équipement réseau est essentiellement composée des stations de base (et d'autres éléments, notamment les antennes) chargées de la réception des messages provenant des objets et de leur transfert aux systèmes d'assistance Sigfox. Le système de soutien opérationnel OSS (Operations Support System) est la deuxième partie de ce qui constitue le cœur du réseau, chargé du traitement des messages et de leur envoi au système du client par le biais de callbacks. Cette partie forme également le point d'entrée pour les différents acteurs de l'écosystème (Sigfox, Opérateurs Sigfox, partenaires commerciaux et clients) pour interagir avec le système par l'intermédiaire d'interfaces Web ou d'API (Application programming Interface). Elle comprend aussi des modules et des fonctionnalités qui sont essentiels au déploiement, au fonctionnement et à la supervision du réseau, tels que le « Business Support System » (BSS) pour les commandes et la facturation, le « Radio Planning » pour le déploiement du réseau. Elle inclut également les espaces de stockage et les outils pour analyser les données collectées ou générées par le réseau. Comme indiqué sur l'illustration ci-dessus, la liaison entre les deux couches est assurée par l'Internet public, mais sécurisée via une connexion VPN (Virtual Private Network) [25].

- **Réseau haute capacité**

La capacité du réseau est très élevée, ce qui permet à Sigfox de faire face aux milliards d'objets que nous ciblons. La capacité massive de l'infrastructure du réseau Sigfox est le résultat des facteurs décrits précédemment :

- La modulation UNB, qui utilise le spectre de manière efficace et résiste aux brouilleurs, toute l'énergie étant concentrée dans une bande passante très étroite;
- La diversité fréquentielle et temporelle découlant de l'accès aléatoire;
- La diversité spatiale, qui est due au chevauchement des cellules réseau [25]

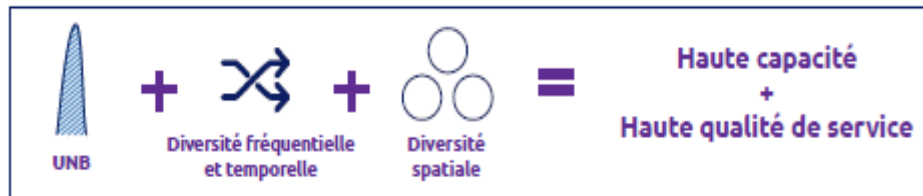


Figure I.15 - Combinaison des spécificités de la technologie Sigfox

- **Les avantages et les inconvénients de Sigfox :**

Avantage:

- Faible puissance nécessaire en raison de l'absence de circuits récepteurs
- La modulation lente permet d'atteindre une portée plus élevée, ce qui le rend le mieux adapté pour des applications simples.
- Développé avec des recherches approfondies dans les régions de San Francisco et en Europe [26].

Inconvénients :

- Les différences dans l'architecture américaine et européenne rendent difficile les tests communs.
- N'offre que la communication uplink.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté des possibilités et des défis des réseaux à courte distance et aussi à grande distance et nous avons mis le point sur les réseaux LPWAN en tant que technologie habilitante pour applications aux objets connectés.

Ce chapitre décrit également les technologies LPWAN de pointe notamment LoRaWAN et SigFox et discuté sur leurs domaines d'application, sur leurs caractéristiques qui leur permettent d'atteindre une connectivité à longue portée, une communication de faible puissance et un faible coût de déploiement pour un grand nombre d'appareils.

Chapitre II

Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

II.1. Introduction

Comme énoncé précédemment le réseau LPWAN c'est une façon de communiquer avec très peu d'énergie, et quand on a peu d'énergie l'antenne peut devenir un facteur consommateur de cette énergie.

Que doit-on faire pour que ces objets puissent bien communiquer tout en préservant leur faible consommation avec des antennes bien adaptées ?

La première chose importante est d'avoir une antenne correspondant à la longueur d'onde de fréquence de travail (f_0). Pour $f_0 = 868\text{MHz}$ la taille de l'antenne est d'environ 34,5cm comparée au $f_0 = 2,4\text{GHz}$ (wifi, Bluetooth...) où nous avons que 12,5cm. Même si la taille est celle-ci pour la longueur d'onde, nous utilisons généralement 1/2 ou 1/4 de la longueur d'onde pour obtenir une taille inférieure. C'est vraiment important d'avoir l'antenne correspondant exactement au quart de la longueur d'onde donc 8,6cm pour une fréquence de 868MHz.

Ce qui va nous pousser à étudier dans ce chapitre les antennes imprimées ou planaires en suite les antennes PIFA (Planar Inverted-F Antenna) et les techniques de miniaturisation des antennes et en fin mettre le point sur les caractéristiques des antennes LPWAN.

II.2. Etude des antennes imprimées

L'antenne représente l'élément principal dans la diffusion des ondes électromagnétiques par rayonnement. Elle joue deux rôles réciproques: la transmission et la réception. C'est ainsi, dans une chaîne de communication, elle est le premier élément d'une chaîne de réception ou le dernier élément d'une chaîne d'émission.

Il existe une panoplie de techniques pour réaliser les antennes, chacune d'elles possède ses propres caractéristiques et sert à une utilisation bien déterminée.

Cette section rappelle les principales caractéristiques des antennes imprimées et une étude des différentes méthodes d'alimentation.

II.2.1. Antennes imprimées

Sous sa forme la plus fondamentale, une antenne imprimée se compose d'une pièce métallique rayonnante sur un côté du substrat diélectrique et un plan de masse de l'autre côté comme représenté sur la figure II.1 [29]. L'élément rayonnant est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur tel que le cuivre ou l'or et il peut prendre n'importe quelle forme [30].

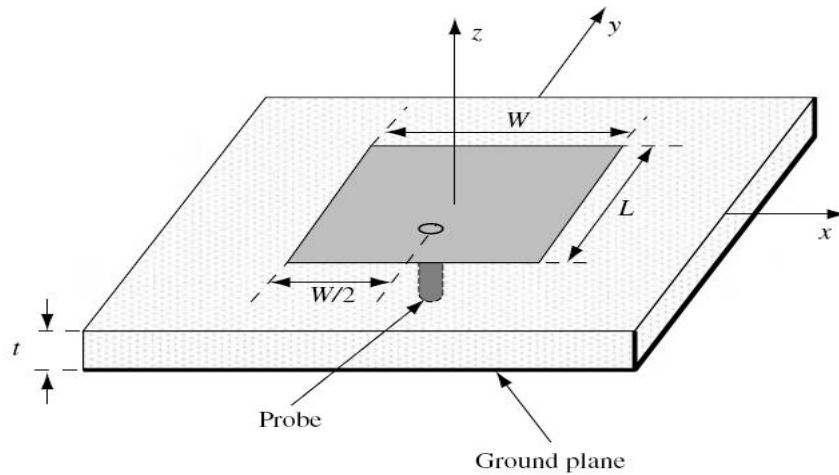


Figure II.1 - Structure d'une antenne en technologie imprimée.

II.2.2. Caractéristiques générales des antennes

D'une manière générale deux groupes de paramètres définissent l'antenne pour décrire leurs caractéristiques et leurs performances. Le premier paramètre considère l'antenne comme élément du circuit électrique dans lequel elle est connectée et le second s'intéresse aux propriétés de rayonnement de l'antenne.

II.2.2.1. La directivité

Elle est définie comme étant la concentration du rayonnement dans une direction donnée.

Considérons deux antennes, la première est isotrope idéal et la deuxième est quelconque. Les intensités de rayonnement pour la même puissance rayonnée sont caractérisées respectivement par $U_0(\theta, \phi)$ et $U(\theta, \phi)$ [28], alors la directivité de la deuxième antenne est donnée par la relation [52]:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0(\theta, \phi)} \quad (\text{II. 1})$$

II.2.2.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion S_{11} met en évidence l'absorption de l'énergie par l'antenne. Les discontinuités présentées par l'antenne peuvent être caractérisées par le coefficient de réflexion, qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation II.2 [28] :

$$S_{11}(f) = \frac{(Z_e(f) - Z_0)}{(Z_e(f) + Z_0)} \quad (\text{II. 2})$$

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Ce paramètre permet de caractériser l'adaptation de l'antenne, le cas idéal $S_{11}(f) = 0$, c'est-à-dire lorsque l'impédance d'entrée de l'antenne vaut $Z_e(f) = Z_0$.

C'est sur ce paramètre que l'on se base généralement lors de l'optimisation de l'antenne [29].

II.2.2.3. Impédance d'entrée de l'antenne

Concernant l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe, modélisé par une source d'impédance d'entrée Z_g qui est de 50 ohm généralement [29].

$$Z_e(f) = R_e(f) + j X_e(f) \quad (\text{II.3})$$

Premièrement La partie réelle de l'impédance d'entrée $R_e(f)$ définit la puissance dissipée par l'antenne sous forme de rayonnement et de perte divers dans sa structure. Secondement La partie imaginaire $X_e(f)$, d'interprétation plus délicate, représente la puissance réactive.

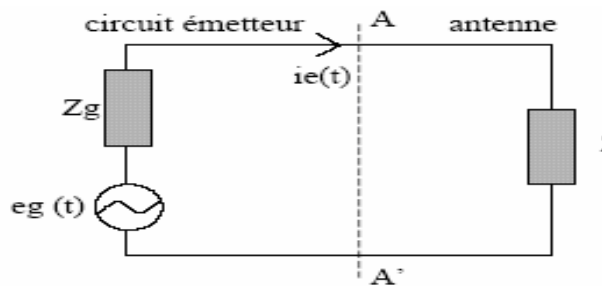


Figure II.2 - Schéma équivalent du dispositif à l'émission

La tension temporelle d'excitation $e_g(f)$ est imposée au générateur. On calcule, à l'aide de la transformée de fourrier, le spectre $e_g(f)$ de cette excitation [52] :

$$e_g(f) = TF \{e_g(t)\} \quad (\text{II.4})$$

- Le calcul du courant $I_e(t)$ est obtenu à partir des équations de Maxwell. Après la transformée de fourrier, le spectre $I_e(f)$ du courant est déterminé par:

$$I_e(f) = TF \{i_e(t)\} \quad (\text{II.5})$$

- L'impédance d'entrée $Z_e(f)$, est obtenue à partir de $E_g(f)$, $I_e(f)$ et l'impédance interne du générateur Z_g [28].

$$Z_e(f) = \frac{TF [e_g(t)]}{TF [i_e(t)]} - Z_g \quad (\text{II.6})$$

II.2.2.4. Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée W_r et la puissance fournie à l'antenne W_f , soit [52] :

$$\eta = \frac{W_r}{W_f} \quad (\text{II.7})$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [29].

II.2.2.5. Le gain

Le gain d'une antenne est une caractéristique importante de ses performances. Il se Définit comme le rapport de l'intensité maximum obtenue au sommet du lobe principal sur l'intensité de rayonnement dans la même direction qui sera produit pour une source isotrope alimentée par la même puissance d'entrée [28]. En pratique le gain, réalisé par l'antenne, est mesuré. Celui-ci est relié à la directivité par la relation suivante [52]:

$$G(\theta, \phi) = \eta \times D(\theta, \phi) \quad (\text{II.8})$$

Où D = directivité de l'antenne

II.2.3. Technique d'alimentation

Une technique d'alimentation appropriée est nécessaire pour faire correspondre l'alimentation et le patch (l'élément rayonnant), et elle permet la transmission de l'énergie d'entrée de la ligne d'alimentation au patch. La figure II.3 [31] montre la conception d'un réseau d'alimentation utilisé pour transmettre efficacement l'énergie d'entrée.

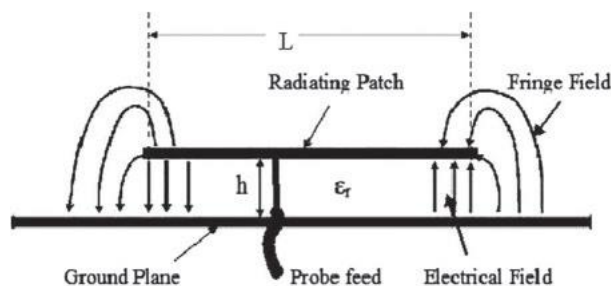


Figure II.3 - Variation des champs de courant.

II.2.3.1. Alimentation par ligne micro ruban

Selon la méthode d'alimentation micro-ruban, le patch métallique d'une antenne est alimenté par une largeur moindre de la ligne micro-ruban par rapport au patch dans le même

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

plan. Par conséquent, une structure unique peut être trouvée à la fois pour l'alimentation et pour l'élément rayonnant [31].

II.2.3.2. Alimentation par câble coaxiale

L'alimentation coaxiale est principalement appliquée pour le transfert de l'énergie d'entrée sur le patch d'une antenne imprimée. C'est la technique fondamentale qui est utilisée pour alimenter la puissance des micro-ondes. La figure II.4 illustre l'arrangement d'alimentation de la sonde coaxiale avec une antenne patch micro rubans. La sonde coaxiale d'un système d'alimentation coaxiale se compose de deux conducteurs, dont le conducteur interne est associé à l'élément rayonnant de l'antenne et le conducteur externe est associé au plan sol.

II.2.3.3. Alimentation couplée par ouverture

La figure II.4 illustre la structure du mécanisme d'alimentation couplé par ouverture. Sa géométrie contient un plan sol avec une fente d'ouverture prise en sandwich entre deux substrats diélectriques, dont l'un a une permittivité plus élevée et l'autre a une permittivité inférieure. Le patch rayonnant est situé à l'extérieur d'un substrat, et la ligne micros-ruban est située à l'extérieur de l'autre substrat. Le couplage de l'énergie d'entrée entre le patch et la ligne d'alimentation est réalisé grâce à une petite fente coupée dans le plan au sol, contrairement à d'autres techniques d'alimentation, l'alimentation couplée par ouverture ne produit pas de faux rayonnement [31]. Pour minimiser la polarisation croisée qui est produite à partir de la configuration symétrique, l'ouverture de couplage de la fente est généralement située sous le centre de la tache rayonnante.

II.2.3.4. Alimentation couplée par proximité

Figure II.4 montre la structure de l'alimentation de couplée par proximité, qui est l'un des mécanismes reconnus de couplage électromagnétique. Dans ce type d'alimentation, l'énergie d'entrée est transférée sur le patch à partir de la ligne micros-ruban par couplage électromagnétique. La technique d'alimentation couplée par proximité se compose d'une ligne micros-ruban, d'un patch et de deux substrats différents. Dans cette structure, le patch est placé sur le côté supérieur d'un substrat et la ligne d'alimentation micro-ruban est placée entre les deux substrats de propriétés différentes [31].

Pour analyser individuellement les performances du patch et de la ligne d'alimentation, cette méthode offre également différents choix entre différents substrats diélectriques. Les paramètres des deux substrats ne peuvent pas être choisis pour être les

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

mêmes pour améliorer les caractéristiques de fonctionnement de l'antenne. L'alimentation de proximité-couplée diminue le rayonnement parasite et augmente la bande passante de fonctionnement. Dans tous les cas, il désire un arrangement exact entre les deux couches dans la conception multicouche.

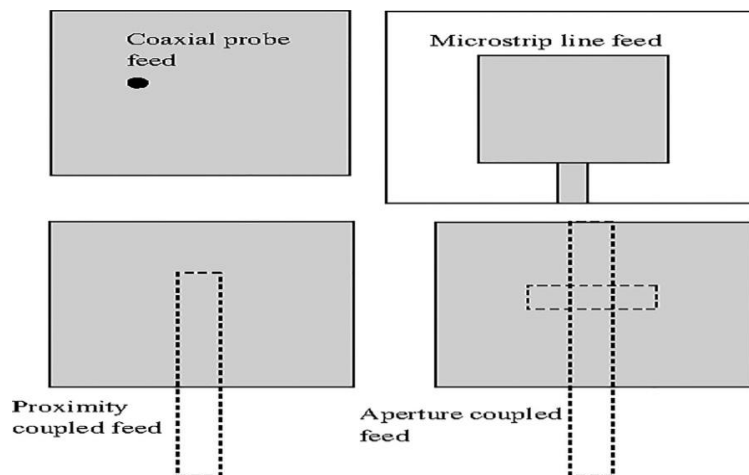


Figure II.4 - Diverses techniques d'alimentation.

Les caractéristiques des diverses techniques d'alimentation sont illustrées dans le tableau II-1.

fonctionnement	sonde coaxiale	ligne Micro-ruban	Couplée par proximité	Couplée par ouverture
Rayonnement parasite	Radiation parasite large	Radiation parasite large	Radiation parasite minimum	Moins de radiation parasite
fiabilité	Faible Fiabilité	Bonne fiabilité	Fiabilité modérée	Fiabilité modérée
Processus de fabrication	Exigence de soudure et de perçage	Facile à fabriquer	Alignement requis	Alignement requis
Impédance correspondante	modérée	Facilement assortie	modérée	Modérée

Tableau II-2- Caractéristiques de diverses techniques d'alimentation

II.3. Etude des antennes PIFA (Planar Inverted-F Antenna)

Les antennes PIFA représentent un choix attrayant pour les objets connectés en raison de leur faible coût, leur simplicité de conception et de leur profil bas. Une antenne PIFA peut être imprimée sur des blocs diélectriques, ainsi les propriétés diélectriques du bloc peuvent être utilisées pour la miniaturisation ou pour améliorer les performances au bord inférieur de la bande. Dans cette section nous allons d'abord énoncer les antennes miniatures et leurs caractéristiques et faire par la suite l'étude des antennes PIFA.

II.3.1. Les antennes miniatures

Par définition, une antenne électriquement petite est un élément rayonnant contenu dans une sphère de rayon inférieur à $\lambda/2\pi$ [48]. Cette valeur correspond à la distance de transition entre le champ proche où l'énergie électromagnétique est stockée dans l'antenne et le champ lointain où l'énergie électromagnétique est rayonnée. Une antenne miniature n'est pas nécessairement une antenne électriquement petite, mais est généralement définie comme ayant des propriétés "d'étroitesse" en termes de dimensions et de longueur d'onde. Typiquement, on considère qu'une antenne est miniature si elle présente des dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde [43].

II.3.1.1. Effet de miniaturisation sur les paramètres de l'antenne

Les antennes électriquement petites, c'est-à-dire de petite taille et les antennes de taille normale possèdent les mêmes caractéristiques.

Un aperçu sur l'effet de la miniaturisation sur les caractéristiques les plus importantes des petites antennes est présenté ci-dessous. Nous essaierons de les détailler dans les sous-sections suivantes.

II.3.1.1.1. Directivité

Théoriquement, il est souvent indiqué que les petites antennes ont un diagramme de rayonnement unidirectionnel et bidirectionnel, avec une directivité D allant de 1,5 à 3dBi. Nous pouvons affirmer que les antennes ont un rayonnement significatif en mode sphérique. Les petites antennes sont également classées comme antennes super directives, puisque pour la taille décroissante, leur directivité D reste constante [40].

La directivité est exprimée mathématiquement par [52]:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (\text{II.9})$$

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Où :

$D(\Theta, \phi)$ est la directivité dans la direction (Θ, ϕ) , $U(\Theta, \phi)$ est l'intensité de rayonnement dans la direction (Θ, ϕ) , U_0 est l'intensité de rayonnement par une source isotrope (indépendant de (Θ, ϕ)), P_{rad} est l'énergie rayonné total.

II.3.1.1.2. Efficacités de rayonnement

L'efficacité du rayonnement est un facteur critique pour les AEP (Antenne Electriquement Petite) mais elle n'a pas été étudiée rigoureusement. Le facteur d'efficacité de rayonnement d'antenne η est simplement le rapport entre la puissance rayonnée P_{ray} et celle acceptée P_{acc} dans l'antenne (la puissance délivrée aux Bornes d'entrée de l'antenne) [41].

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_{acc}} \quad (II.10)$$

D'autre part, si les pertes au niveau de l'antenne sont modélisées par une résistance série R_{loss} , nous pouvons écrire l'efficacité rayonnées sous la forme suivante [52] :

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_A} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} \quad (II.11)$$

Où

R_{rad} est la résistance de rayonnement et R_A est la résistance totale d'entrée.

En pratique, il est observé que lorsque la taille électrique de l'antenne Ka diminue, R_{rad} diminue également. En conséquence R_{loss} devient le terme dominant dans l'équation (II.11) et explique la diminution de l'efficacité. L'origine des pertes dans les antennes dépend des matériaux utilisés pour leur réalisation et sont principalement liées aux pertes par conduction et aux pertes diélectriques et magnétiques [41].

Ainsi l'efficacité rayonnée ne tient pas compte de la désadaptation d'impédance de l'antenne dans sa définition, cette dernière équivaut à la différence entre l'efficacité rayonnée et l'efficacité totale.

II.3.1.1.3. Facteur de qualité de l'antenne

Les études des limites théoriques à la miniaturisation des antennes définissent le facteur de qualité Q comme le rapport entre l'énergie maximale stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée [41]. Ce facteur peut s'écrire sous la forme suivante [52]:

Chapitre II Étude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

$$Q = \frac{2W_0 \max(W_e, W_m)}{P_A} \quad (\text{II.12})$$

Où ; W_e et W_m : énergies électriques et magnétiques stockées moyennées dans le temps.

P_A : puissance reçue par l'antenne.

Les puissances rayonnées sont liées à la puissance reçue à travers [52]:

$$P_{rad} = \eta \cdot P_A \quad (\text{II.13})$$

Où η : rendement de l'antenne.

Une autre caractéristique importante de Q est qu'elle est inversement proportionnelle à la bande passante de l'antenne. Une approximation couramment utilisée entre Q et la bande passante fractionnelle BW de 3 dB de l'antenne est [40]:

$$Q \approx 1/BW \text{ Pour: } Q \gg 1 \quad (\text{II.14})$$

II.3.1.1.4. Impédance d'entrée et correspondance

L'impédance d'entrée des petites antennes est généralement caractérisée par une faible résistance et une réactance élevée. Au fur et à mesure que la taille de l'antenne diminue, la résistance de rayonnement R_{rad} diminue, ce qui provoque la dominance de la réactance de l'antenne [40].

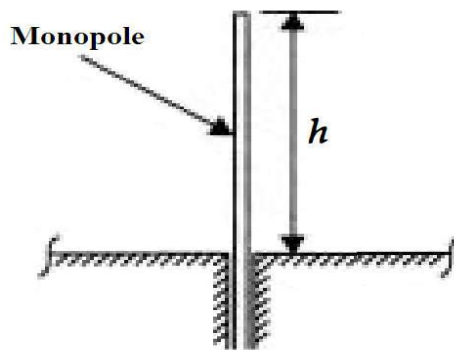


Figure II.5 - Antenne monopole.

En ce qui concerne la Figure II.5 [40], une relation de proportionnalité pratique, pour les Petites antennes monopôles, a été donnée par [52]:

$$R_{rad} = (h/\lambda)^2 \quad (\text{II.15})$$

Où ; h : hauteur du monopôle.

λ : longueur d'onde.

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Ce qui implique que la résistance d'entrée diminue de manière quadratique avec la taille électrique.

II.3.1.2. Les techniques de miniaturisation

La tendance technologique qui consiste à la miniaturisation des objets communicants a connu un certain nombre de technique. Dont la plus répandue consistait à rendre l'objet plus petit que sa forme initiale, en travaillant sur ses trois dimensions à savoir la largeur X , la longueur Y et l'épaisseur Z ce qui impliquait des antennes de plus en plus petites.

Plus l'antenne est petite plus ses performances sont dégradées donc moins adaptées, une antenne est considérée adaptée si son coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB [46] avec un gain positif.

II.3.1.2.1. Techniques pour les antennes à bande étroite

La miniaturisation et l'intégration de l'élément rayonnant dans un système nécessite un compromis à trouver et à faire de la part du concepteur. On dit qu'une antenne est électriquement petite si elle est contenue dans le volume d'une sphère d'un rayon $r = \lambda / (2 * \pi)$ [48] comme énoncé précédemment. L'efficacité de l'antenne devient alors un critère essentiel pour ses performances. Ainsi plusieurs techniques de miniaturisations pour les antennes à bande étroite seront détaillées par la suite.

- **Le substrat**

Le substrat et ses caractéristiques jouent un rôle important dans la miniaturisation. Plus le substrat sur lequel est imprimée l'antenne possède un constant diélectrique élevé, mieux c'est pour la miniaturisation du patch et de son accès. En revanche cette constante élevée entraîne indirectement des pertes importantes dans les matériaux et détériore ainsi la bande passante [32]. Ainsi, les pertes sont cruciales car le facteur de qualité de l'antenne va augmenter et engendrer une diminution de la bande passante.

- **Les nouveaux matériaux**

Une autre technique consiste à fabriquer un matériau de surface à haute impédance se comportant comme un conducteur magnétique artificiel. Sans être déphasées, les ondes émises par l'antenne seront réfléchies tout en permettant de poser l'antenne très près du conducteur artificiel et de concevoir ainsi une antenne directive à faible épaisseur [33].

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

- **Modification du plan de masse**

C'est souvent le plan de masse de l'antenne qui représente l'encombrement principal, c'est pourquoi différentes études ont été menées afin de minimiser les dimensions de ce ou ces plan(s) de masse. Les techniques de miniaturisation sont volumiques ou géométriques. Géométriquement, l'insertion de méandres sur un plan de masse rallonge physiquement le trajet des courants, ce qui, pour une même structure permet de gagner en fréquences basse de la bande passante. En revanche, la géométrie d'un méandre met face à face deux portions métalliques, créant ainsi des effets capacitifs souvent indésirables [34].

- **L'utilisation de composants micro électriques**

Ces éléments peuvent être selfiques ou capacitifs, par exemple une capacité positionnée en bout d'un élément rayonnant permet d'augmenter artificiellement la longueur électrique de l'antenne et donc de diminuer la fréquence de résonance. Cette capacité peut être réalisée par exemple avec une descente verticale de l'élément vers le plan de masse [35].

- **Insertion de court-circuit entre l'élément et le plan de masse**

C'est le concept de l'antenne PIFA : la distribution du champ électrique du premier mode résonant de la cavité formée par un pavé et le plan de masse présente un nul au milieu de la longueur résonante. En positionnant un mur électrique parfait à cet endroit, la distribution du champ électrique n'est pas altérée. Il en résulte alors une antenne ayant une longueur physique $\lambda g / 4$ dite antenne quart d'onde [36].

II.3.1.2.2. Techniques pour les antennes ULB (Ultra large bande)

En ce qui concerne les antennes ULB, toutes les techniques présentées ci-dessus ne sont pas applicables, du fait de la large bande de fréquence qu'il faut couvrir. Un méandre bien dimensionné et proprement placé pourrait améliorer et aurait un effet de miniaturisation sur quelques MHz aux alentours d'une fréquence centrale, mais ce concept ne peut être conservé pour toutes les fréquences dans le cas d'une large bande. Voilà pourquoi en ULB, la technique consiste à abaisser la fréquence basse en essayant de maintenir une bonne adaptation sur toute la bande. Pour cela les techniques suivies et adaptées à l'ULB sont les suivantes [37].

- **Le substrat (méta-matériaux)**

Cette technique utilisée pour les bandes étroites est également applicable à l'ULB, avec le même inconvénient qui est le faible rendement dû aux importantes pertes. On

Chapitre II Étude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

parle de nouveau substrat tel que la céramique plus connu sous l'acronyme LTCC qui signifie en anglais "Low Temperature Co-fired Ceramic" [38].

- **Équivalence 3D – 2D**

Cette technique consiste à supprimer une dimension. Le principe est le passage d'un dipôle $\lambda/2$ à un monopole $\lambda/4$ sur un plan de masse. Ce plan de masse est alors intégré dans le type d'alimentation (coplanaire, ground coplanaire, ...)

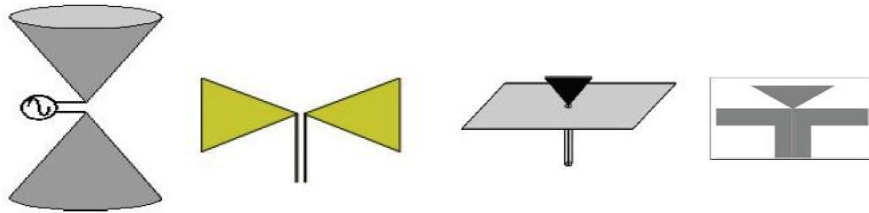


Figure II.6 - Illustration de deux exemples de miniaturisation utilisant la technique du passage d'une structure 3D à une structure 2D [38]

- **L'utilisation de charge discrète**

Elle consiste à insérer des composants électroniques sur la structure (capacité, résistances, ...). Cette méthode n'est pas trop efficace car elle engendre une augmentation des pertes qui reste problématique.

- **Le périmètre**

On parle ici du périmètre de l'antenne, la dernière région sur l'antenne parcourue par les courants avant de se propager dans l'air. La différence de potentiel entre les arêtes constituant le périmètre de l'élément et celles formant les plans de masse forment les ondes électromagnétiques. Ces distributions sur le paramètre sont à la base du comportement de l'onde qui va se propager. Cette technique consiste à réduire l'encombrement voire la surface tout en gardant un même périmètre constant. Toutefois, il faut noter que les performances de l'antenne en termes de rayonnement dépendent de la forme de l'élément et ne sont pas constants même si le périmètre l'est. La miniaturisation se fait dans ce cas-là au détriment de la stabilité de rayonnement de l'antenne [38].

- **Optimisation du trajet des courants**

Cette méthode consiste à rallonger le trajet des courants qui correspondent aux fréquences basses d'adaptation de la bande passante. Sachant que plus la structure est grande, mieux c'est pour l'adaptation en basse fréquence. Ceci dit, afin de miniaturiser

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

la structure, on va la modifier de telle sorte à rallonger les parcours des courants en conservant un encombrement constant de la structure [38].

L'une des techniques les plus utilisées mises en œuvre pour allonger le chemin électrique des courants est l'introduction de fentes dans la structure rayonnante. Le principe utilisé est non seulement de forcer les courants à contourner les fentes inscrites et donc allonger leur trajet, mais aussi d'induire des effets capacitifs et inductifs modifiant l'impédance d'entrée de l'antenne [46]. En changeant les caractéristiques de la fente, la fréquence de résonance est modifiée. En effet, plus la fente est longue et plus la fréquence de résonance diminue. On retrouve les mêmes résultats concernant la largeur de la fente. Il existe aussi des fentes repliées en U, en H, en papillon mais aussi de forme curviligne [47].

- **Transition ligne / antenne**

Cette technique consiste à modifier la transition permettant le passage de la ligne d'alimentation à l'élément rayonnant (figures II.7). Elle a souvent une forme évasée. Il s'agit également de réduire l'encombrement suivant une dimension longitudinale, plus précisément dans l'axe de l'étalement de l'élément. Des entailles peuvent être découpées au niveau des plans de masse latéraux comme dans le cas d'une alimentation en coplanaire ou encore dans le plan de masse inférieure comme dans le cas d'une alimentation de type ground coplanaire. Il est possible de combiner les deux cas.

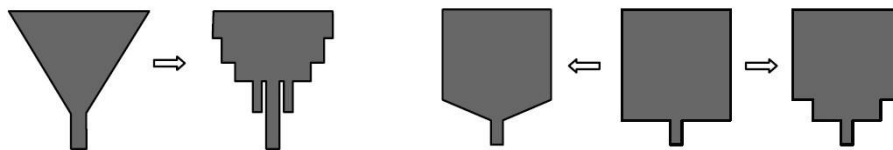


Figure II.7 - Exemples sur les techniques de modification de la transition entre la ligne de transmission et l'élément rayonnant

II.3.2. Les antennes PIFA

Le développement de la technologie des objets connectés a connu une croissance rapide, de nouvelles bandes ont été ajoutées, et le marché demande des petits objets avec plus de services, ce qui nous amène à l'utilisation des antennes miniatures et qui minimisent les risques de rayonnement parasite vers l'être humain.

Les antennes PIFA sont aujourd'hui les plus utilisées dans l'IoT, grâce à leur structure simple et flexible, leur taille réduite, leur faible coût de fabrication et ainsi leur facilité d'intégration.

II.3.2.1.1. Structure d'une antenne PIFA

Cette structure est constituée d'un élément rayonnant métallique parallèle au plan de masse. Un des bords du patch est relié à la masse par un plan de court-circuit qui constitue l'un des particularités de cette antenne. L'élément supérieur est généralement excité par une sonde coaxiale qui pénètre le substrat diélectrique (Figure II.8)

La variation de ses dimensions, la position d'alimentation, le plan du court-circuit, la hauteur du substrat modifient les performances du PIFA [39].

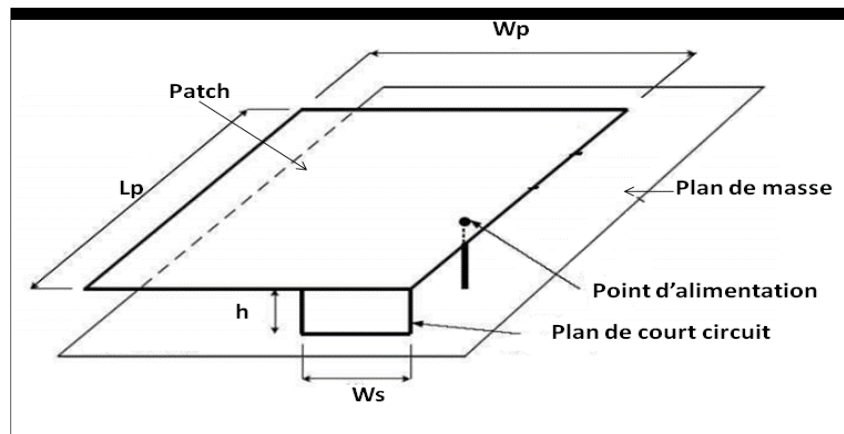


Figure II.8 - Structure d'une antenne PIFA [39].

II.3.2.2. Caractéristiques radioélectriques d'antenne PIFA

II.3.2.2.1. Distribution de champ électrique

La composante dominante du champ électrique E_z est égale à zéro au plan de court-circuit tandis que l'intensité de ce champ au bord opposé de l'élément planaire est sensiblement grande.

Pour les champs E_x et E_y l'élément pointue, qui correspond à la source d'alimentation. Signifie que la ligne électrique de la force est dirigée de la source d'alimentation vers le plan de masse [42].

Quand la largeur du plan de court-circuit est plus étroite que l'élément planaire, le début de champ électrique E_x et E_y se produisant à tous les bords de l'élément planaire.

Ces champs marginaux sont les sources de rayonnement dans l'antenne PIFA [42].

II.3.2.2.2. Distribution du courant

PIFA a des écoulements de courant très grands sur la face inférieure de l'élément planaire et du plan de masse comparé au champ sur la surface supérieure de l'élément. En raison de ce comportement, PIFA est le meilleur candidat quand on parle de l'influence des objets externes qui affectent les Caractéristiques d'antenne [42].

La distribution de courant de PIFA change pour les différentes largeurs des plans de court-circuit la distribution de courant est maximal près du fil de court-circuit et diminue loin de lui.

II.3.2.2.3. L'effet des paramètres de substrat

La largeur de bande d'impédance de PIFA est inversement proportionnelle au facteur de qualité Q qui est défini pour un résonateur par :

$$Q = \frac{\text{Energie stockée}}{\text{Puissance perdue}} \quad (\text{II.16})$$

Le substrat avec la constante diélectrique ϵ_r élevée tend à stocker plus d'énergie que le rayonnement. C'est équivalent en modélisant le PIFA comme condensateur avec ϵ_r élevé. de ce fait la valeur de Q augmente et la largeur de bande diminue. de même quand l'épaisseur de substrat est augmentée, la capacité diminue l'énergie stockée dans le PIFA et également le facteur Q . ce qui augmente la largeur de bande [42].

En résumé, l'augmentation de la taille et la diminution de ϵ_r peuvent être employées pour augmenter la largeur de bande de PIFA.

II.3.2.3. Avantages et inconvénients d'une antenne PIFA

L'antenne PIFA possède plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer [39]:

- Structure simple et flexible.
- Volume réduit.
- Faible coût de fabrication ou faible profile.
- Facilité d'intégration.
- Fréquence de résonance modifiable grâce à l'insertion des fentes.
- Facile à l'adapter en jouant sur la position de l'alimentation.
- Reconfigurable en insérant des diodes et des capacités.
- Sensible à la polarisation horizontale et verticale.

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

- Diagramme de rayonnement omnidirectionnel.
- Antenne multi-bande (double ou triple bande).

L'inconvénient majeur de l'antenne PIFA est la génération d'une bande passante étroite, ainsi une faible efficacité [39].

II.4. Etude des antennes pour objet connecté du réseaux LPWAN.

Les technologies LPWAN reposant sur la bande ISM (868 Mhz en Europe) [49]. Cette bande a été choisie par certains réseaux LPWAN comme LoRaWAN et SigFox pour le marché des objets connectés.

La bande 868 Mhz est en usage libre depuis 20 ans, l'idée de base était d'offrir plus de possibilités que la bande 433 – 434Mhz c'est-à-dire plus de canaux, plus de puissance, plus d'applications tout en restant en court portée (Max 2km) [49].

En 2011, cette bande commence à être utilisée pour les objets connectés par des protocoles radio c'est l'avènement des LPWAN. Ils apportent une rupture par rapport à l'usage « classique » de la bande 868Mhz (une basse consommation, une longue portée, un faible cout).

Mais trop souvent, le travail de développement des équipements LPWAN est mis à mal par le choix d'une antenne médiocre c'est pourquoi le choix de l'antenne est très important selon le projet LoRa ou SigFox, pour qualifier la qualité radio de l'objet en s'assurant que cet objet peut communiquer correctement sur le réseau.

II.4.1. Etude de caractéristique des antennes pour les réseaux LPWAN

II.4.1.1. Typologie d'antennes

L'antenne est une partie critique dans un dispositif communicant et un tel dispositif où la sensibilité est un problème majeur dans la technologie LPWAN par exemple, dans la bande de 868 MHz, pour une antenne $\lambda/4$, la longueur est de 8,6 cm, donc selon l'objet connecté, cela doit être pris en compte lors de la conception mécanique pour placer correctement l'antenne afin d'éviter une perturbation fermée de l'objet lui-même [43].

Les antennes peuvent avoir de nombreux facteurs de forme différents [43], ils peuvent être droit ou roulé, éventuellement tirée sur un filet PCB (Printed Circuit Board) ou inclus dans un composant en céramique. Fondamentalement, nous aurons un résultat radio différent qui dépend des antennes. La différence peut être liée au gain (ou à la perte) de l'antenne et à la directivité de l'antenne.

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Nous avons ci-dessous quelques exemples d'antennes les plus utilisées dans les technologies des objets connectés pour application aux réseaux LPWAN.



Figure II.9 - Antenne PIFA pour objet connecté.

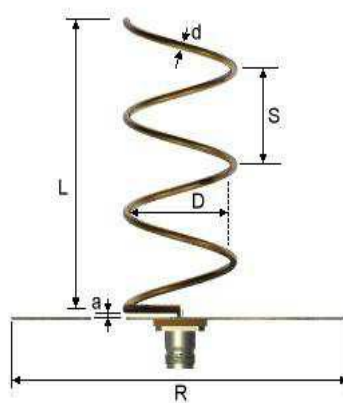


Figure II.10 - Schéma de l'antenne hélicoïdale protégée par un châssis plastique [3]

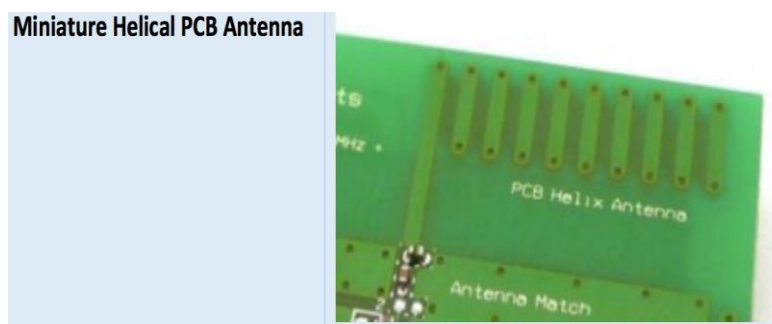


Figure II.11 – antenne monopole miniature sur PCB.

II.4.1.2. Caractéristiques radioélectriques des antennes LPWAN

II.4.1.2.1. Bande passante et fréquence de travail

La bande passante est la gamme de fréquences sur laquelle un coefficient de réflexion maximal n'est pas dépassé. Il s'agit donc de la bande de fréquences où l'antenne est

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

suffisamment adaptée pour opérer sans trop de pertes de puissance par désadaptation. Ainsi, pour couvrir une application utilisant une certaine bande de fréquences, la bande passante de l'antenne doit être au moins égale à celle de l'application [3].

Les systèmes LPWAN sont de nos jours déployés dans des bandes de fréquences harmonisées à l'échelle régionale pour les objets connectés comme suit.

- Dans les pays de la CEPT (Conférence européenne des administrations des Postes et Télécommunications), la plupart des infrastructures LPWAN sont exploitées dans la bande 865-870 MHz disponible pour les objets connectés. En particulier, elles fonctionnent dans la bande 865-868,6 MHz avec une puissance de 25 mW et dans la bande 869,4-869,65 MHz avec 500 mW de puissance et utilisent des techniques de limitation des brouillages telles que la limitation du facteur d'utilisation [44].
- Dans la gamme 902-928 MHz, une utilisation sans licence avec une puissance d'émission allant jusqu'à une puissance de 4 W est généralement permise [44].
- Des réseaux LPWAN sont déployés en fonction des spécificités de chaque pays. Récemment, plusieurs administrations d'Asie-Pacifique ont autorisé des services LPWAN dans la gamme 915-925 MHz, reposant sur différentes techniques et normes d'accès au spectre [44].

II.4.1.2.2. Gain et rendement

Le gain d'une antenne est un paramètre qui prend en compte ses performances électriques pour exprimer le rayonnement dans une direction donnée comme annoncé précédemment.

Il faut noter que l'énergie fournie par l'antenne au-dessus de l'air n'est pas égale à l'énergie fournie par l'émetteur à l'antenne. D'habitude, on a des pertes. Nous utilisons habituellement dB (Décibel) comme une échelle pour exprimer ce gain / perte. Fondamentalement, dB est une unité logarithmique pour exprimer la différence [45].

Une différence de -3dB signifie que la moitié de la puissance a été atténuée par le circuit de l'antenne. La réglementation est basée sur ce que l'on pousse dans les airs, pas sur ce que l'émetteur envoie. Donc, fondamentalement, on peut émettre avec plus de puissance pour compenser la perte de circuit d'antenne, ça permet en d'autres termes d'améliorer le rendement de l'antenne. Le problème lié à cette solution est la consommation d'énergie, deux fois la puissance du mode signifie une autonomie divisée par deux sur les batteries [45].

Chapitre II Etude des antennes planaires pour objets connectés LPWAN

Par exemple chez SigFox, d'où il y a plusieurs catégories (u_0 , u_1 , u_2 , u_3) pour qualifier la qualité radio de l'objet [45].

- u_0 14dBm +/- 2dBm
- u_1 entre 12dBm et 7dBm
- u_2 entre 7dBm et 0dBm
- u_3 au – dessous de 0dBm

Lorsqu'on a un statut u_0 cela signifie que l'antenne fournira plus de la moitié de la puissance nominale de 25 mW. 7dBm signifie que l'objet ne livre que moins de 6 mW en l'air.

Fondamentalement, avoir un objet u_0 nous donnera la meilleure couverture réseau, c'est-à-dire un meilleur rendement du réseau mais u_1 , u_2 , u_3 peut également être un objet de travail [45].

Être un u_1 avec 12-10dBm est déjà un bon résultat et fonctionnera dans de nombreux cas, principalement lorsqu'on veut cibler d'abord un marché urbain où l'objet sera écouté par de nombreuses antennes.

II.5. Conclusion

Comme énoncé précédemment les objets connectés sur le réseau LPWAN sont généralement à faible volume, c'est ainsi que dans ce chapitre nous avons fait une étude paramétrique des antennes imprimées et antenne PIFA enfin de parvenir à réduire l'encombrement de l'antenne d'où sa miniaturisation pour mieux l'intégrer dans les objets connectés.

Le prochain chapitre sera dédié à la conception et à la miniaturisation des antennes pour objet connecté au réseau LPWAN, qui fonctionne à la fréquence 868MHz.

Chapitre III

**Conception et miniaturisation des
antennes PIFA**

III.1. Introduction

Après la présentation de l'antenne patch puis l'antenne PIFA et ainsi voir l'effet de la miniaturisation sur les paramètres de ces antennes, qui ont fait l'objet du chapitre précédent, on s'est consacré dans ce troisième chapitre à la conception et à la miniaturisation des antennes pour objets connectés au réseau LPWAN, qui fonctionnent à la fréquence 868MHz.

Un premier travail consistera à concevoir cette antenne PIFA, l'analyse des résultats fait partie du travail évoqué puis le deuxième travail consistera à miniaturiser cette antenne.

Plusieurs techniques de miniaturisation seront utilisées, pour ça nous allons proposer deux exemples d'antenne miniature : La première est développée à partir d'une antenne imprimée, par la modification de la géométrie de l'élément rayonnant sous forme de méandre et pour la deuxième en insérant une fente en forme de U.

Nous présenterons ensuite les résultats de simulation tout en menant une étude paramétrique sur les effets des divers paramètres afin de les optimiser et aboutir à une structure finale efficace. Ceci se fera à l'aide de l'outil de simulation électromagnétique CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio [Annexe].

Puis enfin une partie conséquente de ce chapitre sera consacrée à la validation des résultats par le biais du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator). Ainsi une étude de comparaison sur les résultats de simulation des paramètres essentielle de l'antenne à savoir : le coefficient de réflexion le diagramme de rayonnement et le gain, obtenus avec le logiciel CST seront comparés avec ceux obtenus à travers HFSS.

III.2. Antenne PIFA fonctionnant à la fréquence du standard LoRa 868Mhz

Dans cette section, nous énoncerons les aspects théoriques et de conception de l'antenne LoRa 868MHz, pour laquelle nous allons analyser les performances en termes de caractéristiques de rayonnements, plus particulièrement : le coefficient de réflexion, la directivité, le gain et le diagramme de rayonnement.

III.2.1. Méthodologie de la conception

Notre antenne PIFA, va être simulée sur un substrat FR-4 ayant une permittivité $\epsilon_r = 4.4$ et une longueur d'onde de $\lambda_0 = 348\text{mm}$ correspondant à la fréquence de travail $f_0 = 868\text{MHz}$.

La longueur de l'antenne coïncidera exactement au quart de la longueur d'onde c'est-à-dire $\approx 86\text{mm}$. Les métallisations de l'antenne sont en cuivre d'épaisseur $t = 35\ \mu\text{m}$. L'antenne

PIFA est constituée d'un élément rayonnant de forme rectangulaire relié ou bien court-circuité à un plan de masse conducteur. Contrairement à une antenne PIFA classique, le court-circuit n'est pas réalisé sur toute la largeur de l'antenne mais à travers un court-circuit plan qui est une languette métallique. Ils sont imprimés sur un substrat FR-4 d'épaisseur $h = 1,6$ mm.

III.2.1.1. Modèle proposé

Cette structure est composée d'un plan de masse GND de dimension $L_g \times W_g \times t$ mm³, au-dessus du GND nous avons un substrat FR-4 de dimension $L_s \times W_s \times h$ mm³, en suite nous avons l'élément rayonnant de dimension $L \times W \times t$ mm³ relié au GND par un court-circuit et enfin toute la structure est alimentée par une sonde coaxiale de diamètre interne D_1 (conducteur interne), de diamètre externe D_2 (conducteur externe) et de hauteur D_3 .

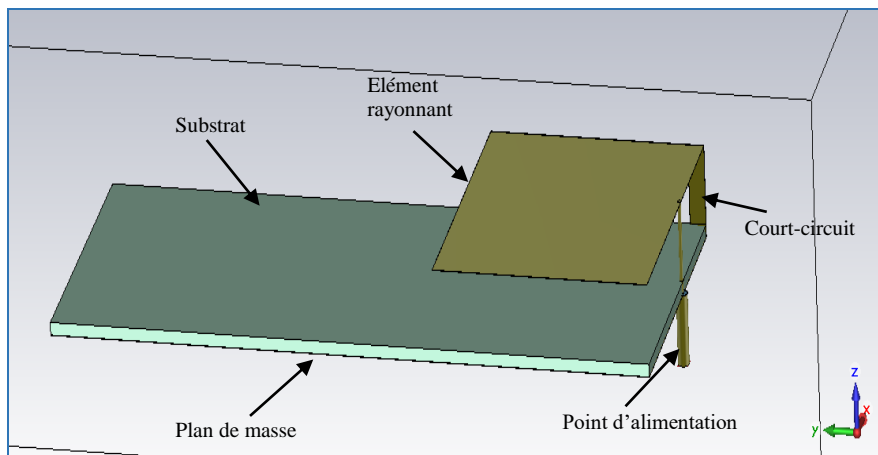


Figure III.1 - Structure de l'antenne sur le rédacteur de CST studio.

III.2.1.2. Configuration et études paramétriques de l'antenne

Une série d'études paramétriques a été menée pour pouvoir appréhender davantage la structure de l'antenne. Elles ont principalement pour objectif de bien comprendre l'influence des différents paramètres sur la fréquence de travail de l'antenne ainsi que son adaptation.

III.2.1.2.1. Les dimensions de l’antenne

Les différents paramètres géométriques de l’antenne sont représentés dans le tableau III.1 suivant :

paramètres	symboles	Valeurs (mm)
Largeur de l’antenne	W	46
Longueur de l’antenne	L	40
Largeur du GND	W _g	46
Longueur du GND	L _g	112
Largeur du substrat	W _s	46
Longueur du substrat	L _s	112
L’épaisseur du GND et de l’antenne	t	0.035
L’épaisseur de substrat	h	1.6
Espace air	h _{air}	10
Diamètre du conducteur interne	D1	0.625
Diamètre du conducteur externe	D2	2.05
Hauteur de la sonde coaxiale	D3	9
Position de la sonde suivant l’axe x	xfeed	4.5
Position de la sonde suivant l’axe y	yfeed	0.3475
Largeur du court-circuit	S _{c-r}	3

Tableau III–1- Dimensions paramétrique de l'antenne.

III.2.1.2.2. Effet du positionnement du point d’alimentation

Afin d’observer l’influence du positionnement de la sonde coaxiale sur l’adaptation de l’antenne LoRa 868MHz, nous avons fait varier xfeed (la position de la sonde suivant l’axe

des X) de 3 mm à 5 mm avec un pas de 0.5 mm. La courbe illustrée sur la Figure III- 2 montre que l’augmentation de xfeed provoque une faible diminution de la fréquence de résonance. L’adaptation optimale est obtenue pour la position : $x_{feed} = 4.5\text{ mm}$.

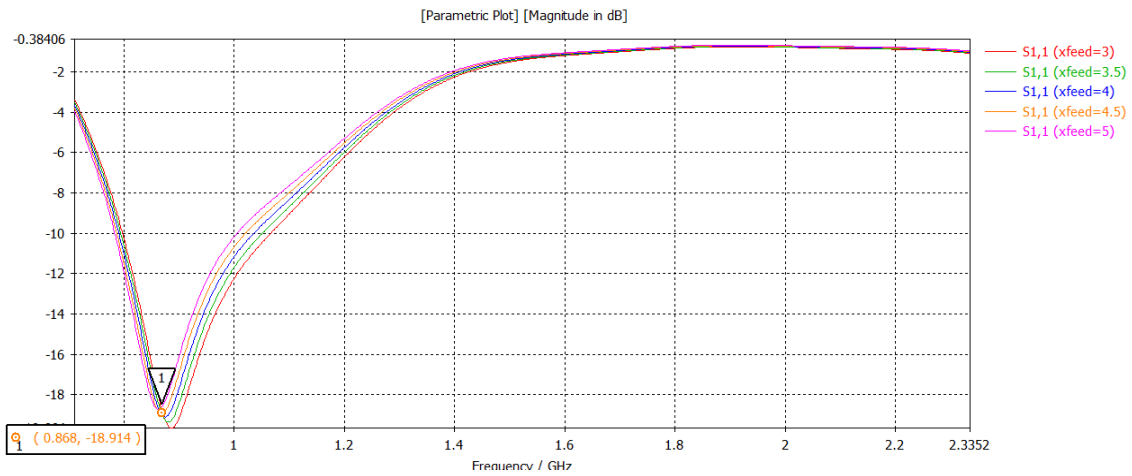


Figure III.2 - Effet de la variation du point d’alimentation xfeed sur la fréquence de résonance.

III.2.1.2.3. Effet de l’espace air

Toujours pour l’optimisation de l’antenne nous avons fait varier le h_{air} qui est l’espace entre l’élément rayonnant et le substrat de 0 à 10mm avec un pas de 2mm comme représenté sur la figure III.3. L’analyse de la courbe montre que l’augmentation de h_{air} provoque une faible augmentation de la fréquence de résonance avec une variation du coefficient de réflexion, l’adaptation optimale est obtenue pour : $h_{air} = 10\text{ mm}$.

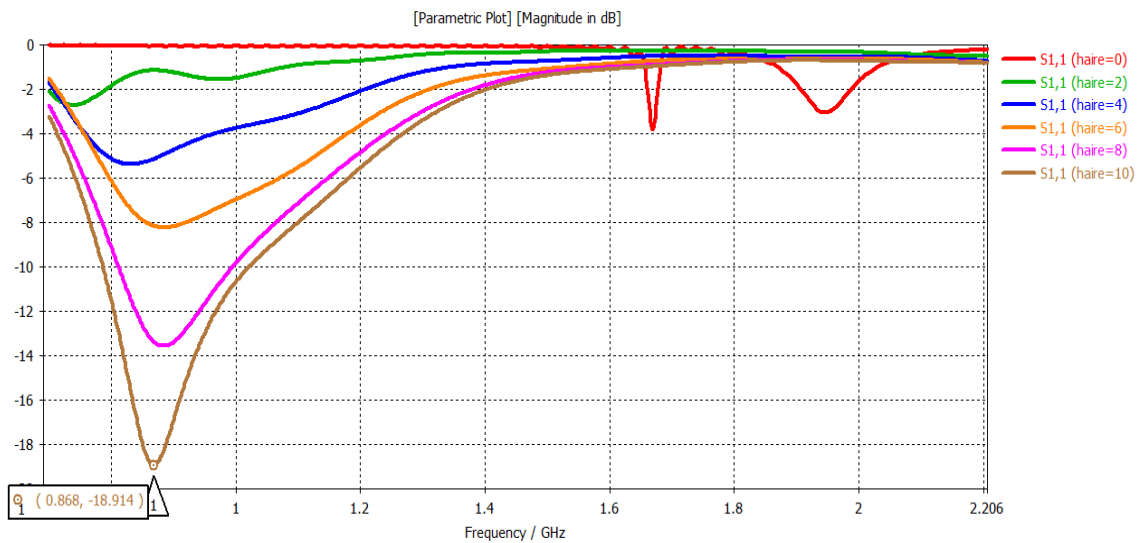


Figure III.3 – Effet de la variation de l’espace air (h_{air}) sur la fréquence de résonance.

III.2.2. Présentation et analyse des résultats de simulation

Dans cette partie, nous allons présenter et évaluer l'ensemble des résultats de simulation de l'antenne conçue en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement et le gain ensuite une interprétation de ces résultats sera effectuée.

III.2.2.1. Coefficient de réflexion

La figure suivante présente le coefficient de réflexion de l'antenne dans la gamme de fréquence [0.7-3 GHz].

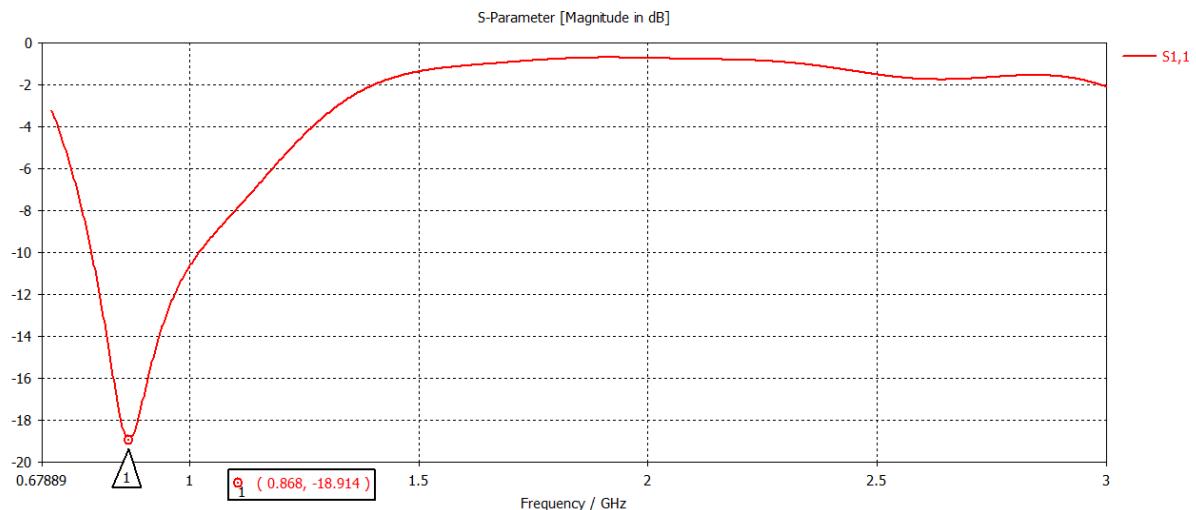


Figure III.4 - Le coefficient de réflexion S11 en dB.

D'après la figure III. 4 nous constatons que la résonance de l'antenne est correctement obtenue à 868 MHz avec un pic de -18.9 dB.

III.2.2.2. Diagramme de rayonnement et gain

La figure III.5 montre la direction du champ électromagnétique rayonnée dans les plans xz ($\phi=0$), yz ($\phi=90^\circ$) et Plan xy ($\theta=90^\circ$) à la fréquence de 868MHz.

Le rayonnement est bipolaire dépendant de $\phi=90$ et de $\theta=90$, mais dans le plan $\phi=0$ le rayonnement ne se fait que dans un demi plan, la puissance est concentrée dans un lobe principale orienté vers la verticale ($\theta=-4^\circ$).

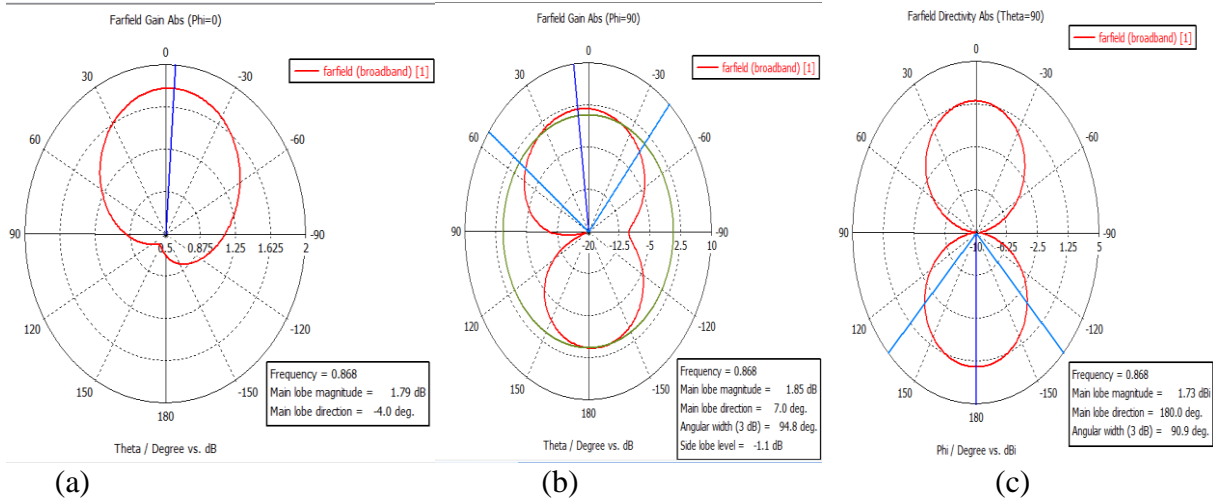


Figure III.5 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire (a) xz ($\phi=0^\circ$), (b) yz ($\phi=90^\circ$), (c) xy ($\theta=90^\circ$).

La Figure III.6 représente le tracé du rayonnement en 3D qui donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement qui confirme que le rayonnement de l'antenne est globalement bien omnidirectionnel avec un gain de 1,79dB.

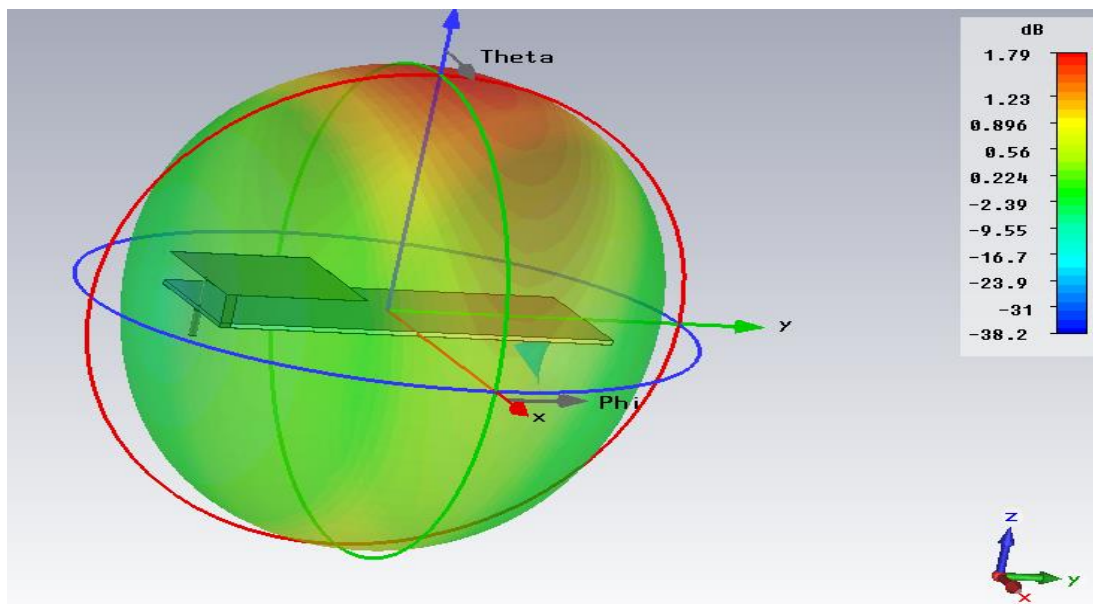


Figure III.6 - Diagramme de rayonnement en 3D.

III.3. Miniaturisation de l'antenne PIFA fonctionnant à la fréquence 868Mhz

Après avoir défini le type de l'antenne PIFA et ainsi analyser ces caractéristiques nous nous sommes intéressés à la miniaturisation qui consiste à réduire la taille globale (quart d'onde) de l'antenne. Cependant nous allons proposer deux exemples, le premier consistera à concevoir une antenne sur circuit PCB (*printed circuit board*) sous forme de méandre et parvenir à une miniaturisation de 30% et le second consistera à placer une fente à U sur

l'élément rayonnant avec une échelle de miniaturisation de 50% après nous allons analyser l'influence de ses différents paramètres géométrique en terme de caractéristiques de rayonnement, du coefficient de réflexion, de la directivité, du gain et du diagramme de rayonnement afin de mieux comprendre leurs fonctionnements.

III.3.1. Première topologie

III.3.1.1. Méthodologie de la conception

Parmi les techniques de miniaturisation nous avons choisi deux méthodes à savoir la technique de réduction de la taille de l'élément rayonnant et l'utilisation du méandre. Nous allons d'abord commencer par la réduction de la taille à l'échelle de 30% par rapport à la taille initiale de l'antenne. Pour parvenir à cette échelle de miniaturisation sur l'élément rayonnant, nous avons réduit les dimensions W et L du patch tout en gardant l'espace air h_{air} entre le substrat et l'élément rayonnant et enfin nous utiliserons une structure de méandre sur le patch.

III.3.1.1.1. Modèle proposé

Cette structure est composée d'un plan de masse GND de dimension $L_g \times W_g \times t$ mm³, au-dessus du GND nous avons un substrat FR-4 de dimension $L_s \times W_s \times h$ mm³ avec une permittivité de 4,4, en suite nous avons l'élément rayonnant de dimension $L \times W \times t$ mm³, le patch est relié au GND par un court-circuit et enfin toute la structure est alimentée par une sonde coaxiale de rayons interne $D1$ (conducteur interne) et de rayon externe $D2$ (conducteur externe) et de hauteur $D3$.

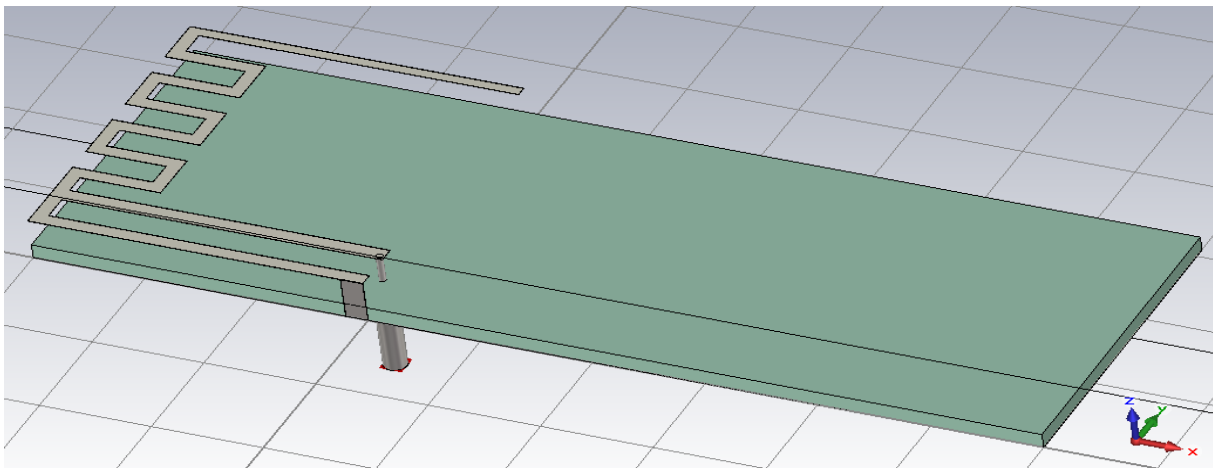


Figure III.7 - Topologie de l'antenne miniaturisé à 30% sur CST

III.3.1.1.2. Configuration des paramètres de l’antenne

Les différents paramètres géométriques de l’antenne sont représentés dans le tableau III.2

Ces dimensions ont été optimisé grâce à une variation des différents paramètres de l’antenne à savoir les dimensions de la fente, l’espace air et la position du point d’alimentation.

paramètres	symboles	Valeurs (mm)
Largeur de l’antenne	W	31
Longueur de l’antenne	L	30
Largeur du GND	W _g	31
Longueur du GND	L _g	60
Largeur du substrat	W _s	31
Longueur du substrat	L _s	60
L’épaisseur du GND	t	0.035
L’épaisseur de substrat	h	1.6
Espace air	h _{air}	3
Diamètre du conducteur interne	D1	0.625
Diamètre du conducteur externe	D2	2.05
Hauteur de la sonde coaxiale	D3	9
Position de la sonde suivant x	xfeed	-0.5
Position de la sonde suivant y	yfeed	4.25
Largeur du court-circuit	S _{c-r}	2

Tableau III–3 - Dimension paramétrique de l'antenne miniaturisé à 30%.

III.3.1.2. Présentation et analyse des résultats de simulation

Dans cette partie, nous allons présenter et évaluer l'ensemble des résultats de simulation de l'antenne conçue en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement et le gain.

III.3.1.2.1. Coefficient de réflexion

La figure III.8 présente le coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 50% dans la gamme de fréquence [0 – 2 GHz].

D'après cette même figure nous constatons que la résonance de l'antenne est obtenue à 868 MHz avec un pic de -16.83 dB.

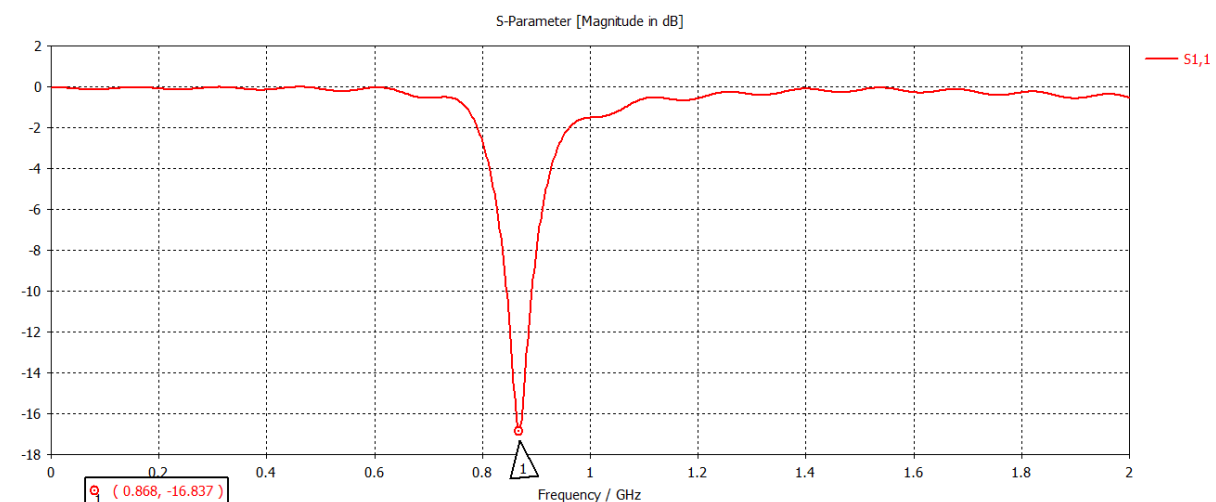


Figure III.8 - Le coefficient de réflexion S11 en dB de l'antenne miniaturisé à 30%.

III.3.1.2.2. Diagramme de rayonnement et gain

La figure III.9 montre la direction du champ électromagnétique rayonnée dans les plans xz ($\phi=0$), yz ($\phi=90^\circ$) et Plan xy ($\theta=90$) à la fréquence de 868MHz.

Le diagramme de rayonnement est bipolaire dépendant des plan $\phi=0$ et de $\theta=90$. On remarque que dans le plan xz , la puissance de rayonnement est concentrée dans un seul lobe orienté vers la verticale ($\theta=94^\circ$).

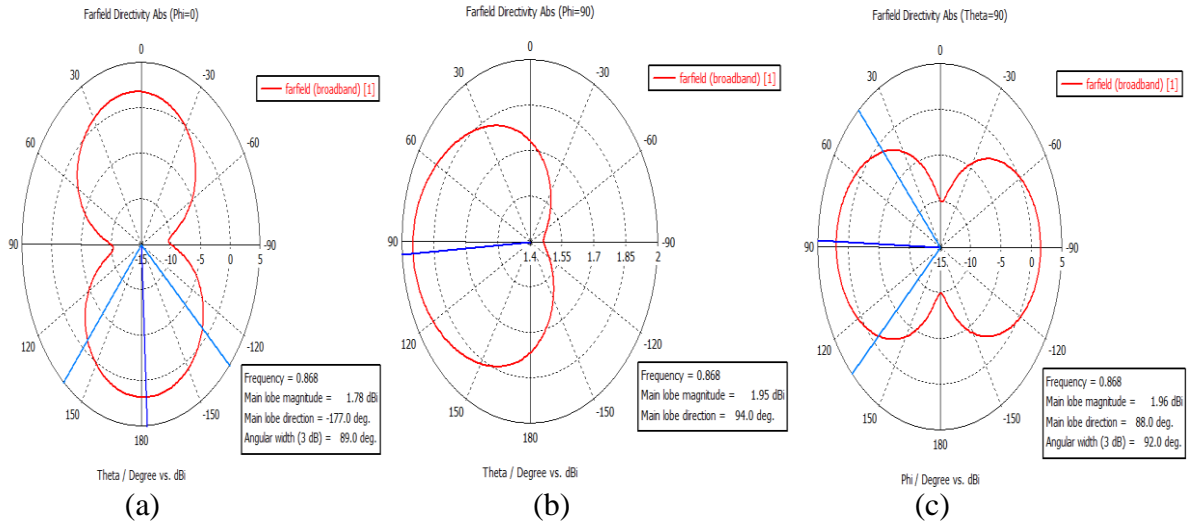


Figure III.9 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire de l'antenne miniaturisé à 30%
 (a) xz (phi=0°), (b) yz (phi=90°), (c) xy (theta=90°).

La Figure III.10 représente le tracé du rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 30% qui donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement qui confirme que le rayonnement de l'antenne est omnidirectionnel avec un gain de 1,41dB.

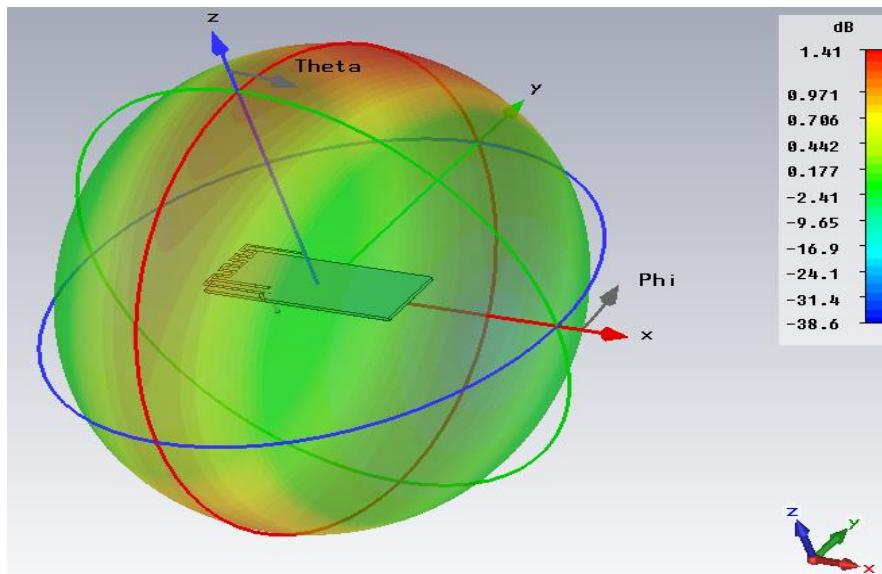


Figure III.10 - Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 30%.

III.3.2. Deuxième Topologie

III.3.2.1. Méthodologie de la conception

Parmi les techniques de miniaturisation nous avons choisi deux méthodes à savoir la technique de réduction de la taille de l'élément rayonnant et l'implantation d'une fente. Premièrement, nous allons commencer par une réduction de la taille à l'échelle de 50%. Pour parvenir à cette échelle de miniaturisation sur l'élément rayonnant, nous avons réduit les dimensions W et L du l'élément rayonnant en suite nous avons ajouté un autre substrat sous l'élément rayonnant tout en gardant l'espace air h_{air} entre les deux substrats et enfin nous avons inséré une fente à U sur le patch de longueur 24mm et de largeur 2mm.

III.3.2.1.1. Modèle proposé

Cette structure est composée d'un plan de masse GND de dimension $L_g \times W_g \times t$ mm³, au-dessus du GND nous avons un substrat FR-4 de dimension $L_s \times W_s \times h$ mm³ avec une permittivité de 4,4, en suite nous avons l'élément rayonnant de dimension $L \times W \times t$ mm³ en dessous duquel on a un deuxième substrat de même dimension, le patch est relié au GND par un court-circuit et enfin toute la structure est alimentée par une sonde coaxiale toujours de rayons interne $D1$ (conducteur interne) et de rayon externe $D2$ (conducteur externe) et de hauteur $D3$.

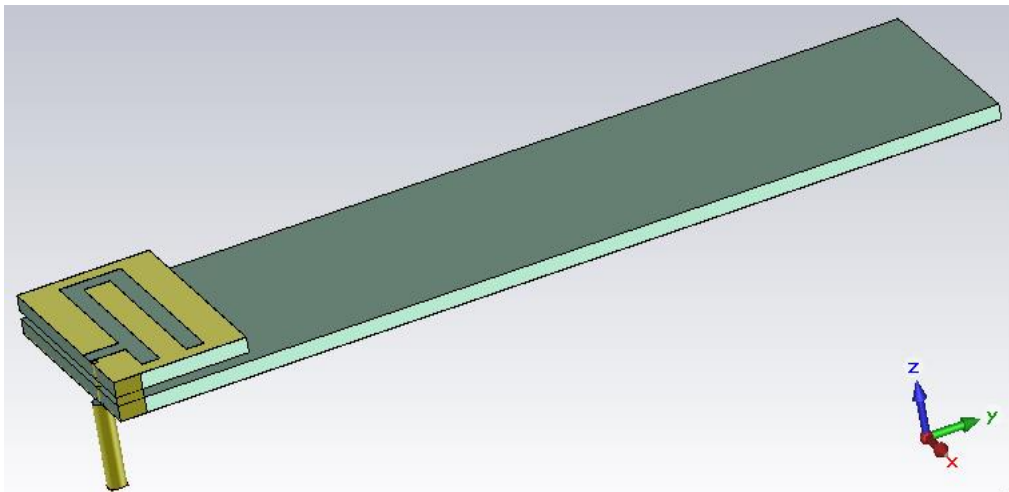


Figure III.11 – Topologie de l'antenne miniaturisé à 50% sur CST.

III.3.2.1.2. Configuration des paramètres de l'antenne

Les différents paramètres géométriques de l'antenne sont représentés dans le tableau III.3, ces dimensions ont été optimisé grâce à une variation des différents paramètres de l'antenne à savoir les dimensions de la fente, l'espace air et la position du point d'alimentation.

paramètres	symboles	Valeurs (mm)
Largeur de l'antenne	W	28
Longueur de l'antenne	L	15
Largeur du GND	W _g	28
Longueur du GND	L _g	100
Largeur du substrat	W _s	28
Longueur du substrat	L _s	100
L'épaisseur du GND	t	0.035
L'épaisseur de substrat	h	1.6
Espace air	h _{air}	2.5
Diamètre du conducteur interne	D1	0.625
Diamètre du conducteur externe	D2	2.05
Hauteur de la sonde coaxiale	D3	9
Position de la sonde suivant x	x _{feed}	7.7
Position de la sonde suivant y	y _{feed}	0.3475
Largeur du court-circuit	S _{c-r}	3
Largeur de la fente	W _f	2
de Longueur la fente	L _f	24

Tableau III-3- Dimension paramétrique de l'antenne miniaturisé à 50%.

III.3.2.2. Présentation et analyse des résultats de simulation

Dans cette partie, nous allons présenter et évaluer l'ensemble des résultats de simulation de l'antenne conçue en termes de coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement et le gain. Ensuite une validation de ces résultats se fera à l'aide du logiciel HFSS.

III.3.2.2.1. Coefficient de réflexion

La figure III.12 présente le coefficient de réflexion de l'antenne miniaturisé à 50% dans la gamme de fréquence [0.5 – 1.5 GHz].

D'après cette même figure nous constatons que la résonance de l'antenne est correctement obtenue à 868 MHz avec un pic de -32.937 dB.

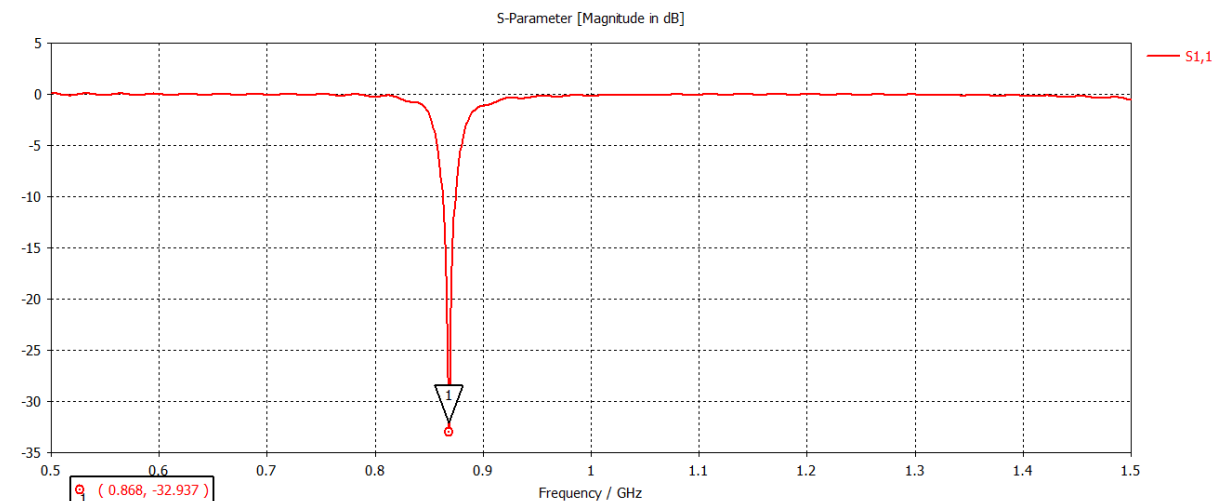


Figure III.12 - Le coefficient de réflexion S11 en dB de l'antenne miniaturisé à 50%.

III.3.2.2.2. Diagramme de rayonnement et gain

La figure III.13 montre la direction du champ électromagnétique rayonnée dans les plans xz ($\phi=0$), yz ($\phi=90^\circ$) et Plan xy ($\theta=90$) à la fréquence de 868MHz.

Le diagramme de rayonnement est bipolaire dans le plan $\phi=90$ et $\theta=90$. Mais dans le plan xz , la puissance de rayonnement est concentrée dans un lobe principale orienté vers la verticale ($\theta=50^\circ$) et un lobe secondaire concentré a peut prêt vers un angle de -170° .

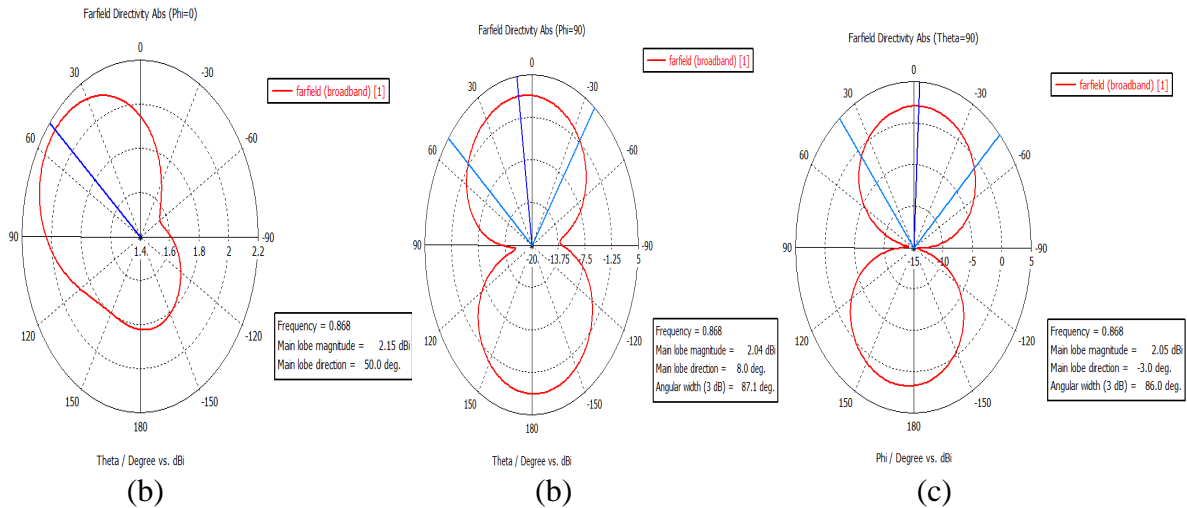


Figure III.13 - Diagramme de rayonnement sur le plan polaire de l'antenne miniaturisé à 50%
 (a) xz (phi=0°), (b) yz (phi=90°), (c) xy (theta=90°).

La Figure III.14 représente le tracé du rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 50% qui donne une meilleure exploration du diagramme de rayonnement qui confirme que le rayonnement de l'antenne est globalement bien omnidirectionnel avec un gain de 1,77dB.

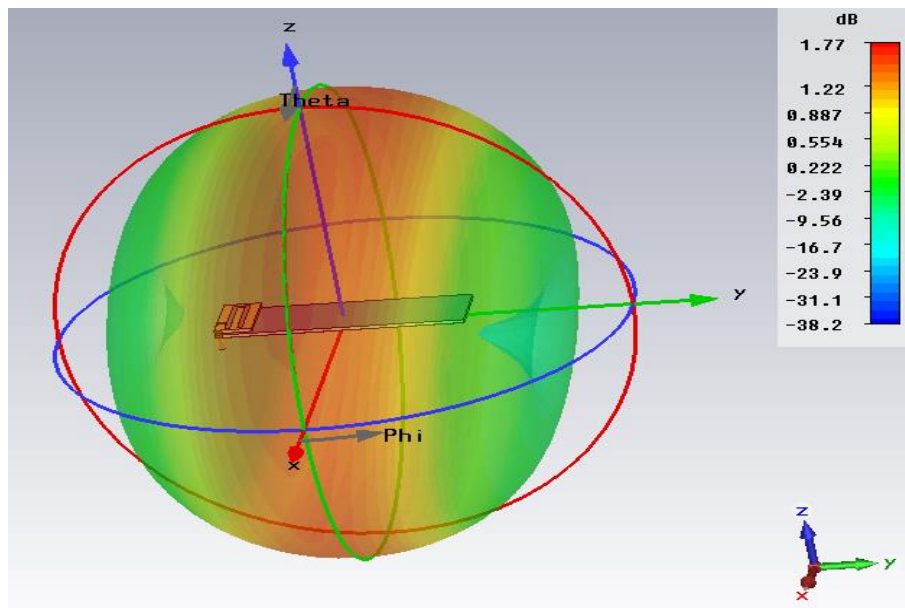


Figure III.14 - Diagramme de rayonnement en 3D de l'antenne miniaturisé à 50%.

III.3.2.3. Validation des résultats

La conception des antennes dans la bande millimétrique est très délicate vu les petites dimensions des composants. On utilisera un deuxième logiciel (HFSS) pour valider les

Chapitre III Conception et miniaturisation des antennes PIFA

résultats de la simulation. La figure III.15 montre la simulation du coefficient de réflexion (S_{11}) avec les logiciels CST et HFSS. Les deux outils de simulation prévoient un bon coefficient de réflexion qui dépasse -12 dB, ce résultat est très encourageant, sachant qu'une antenne est acceptable au niveau du coefficient de réflexion à partir de -10 dB de ce fait nous avons trouvé respectivement sur HFSS et sur CST -12,24 dB avec une fréquence de résonance de 883MHz et -32.937 dB avec une fréquence de résonance de 868MHz.

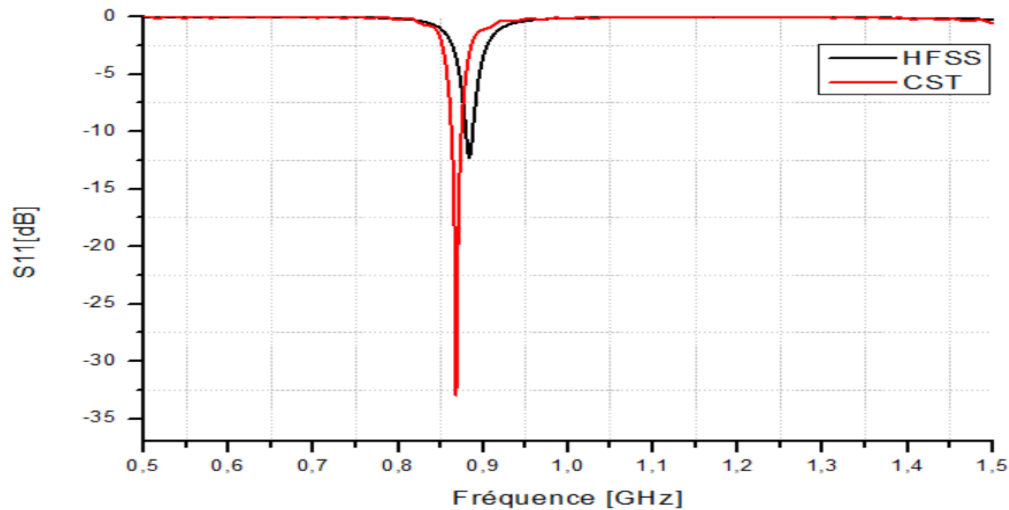


Figure III.15 - Comparaison du coefficient de réflexion de l'antenne obtenu avec CST et HFSS

Les diagrammes du champ rayonné des deux logiciels pour les plans $\phi=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ et $\theta=90$ sont tracées respectivement dans les figure III.16a, figure III.16b et figure III.16c. Les deux logiciels présentent des valeurs proches dans les deux 3 plans xz , yz et xy .

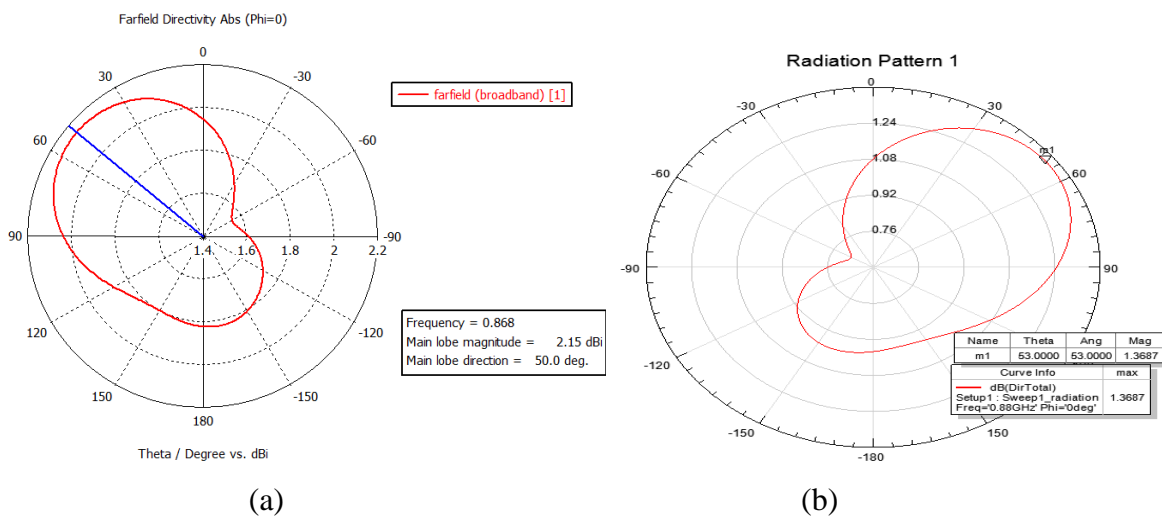


Figure III.16a - Diagramme de rayonnement pour xz $\phi=0^\circ$ (a) CST (b) HFSS.

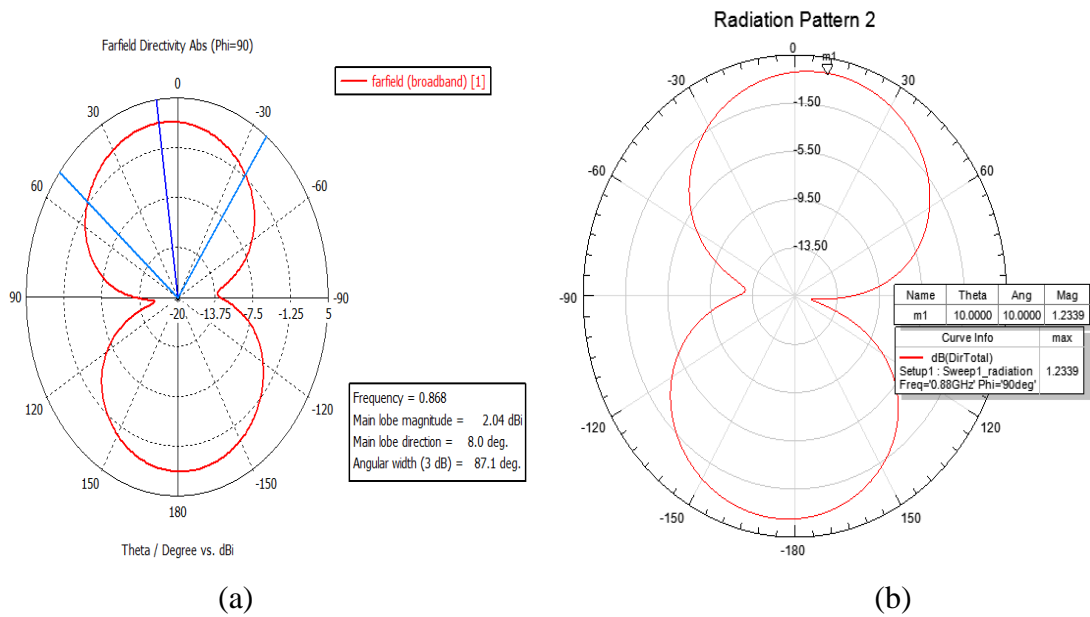


Figure III.16b - Diagramme de rayonnement pour yz phi=90° (a) CST (b) HFSS.

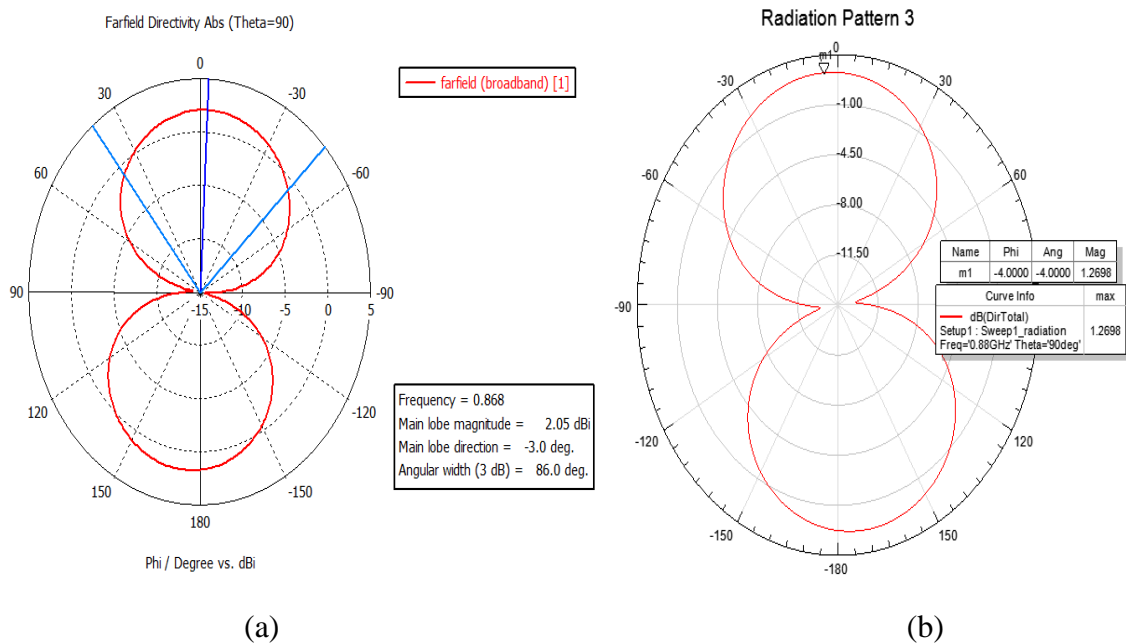


Figure III.16c - Diagramme de rayonnement pour xy (theta=90°) (a) CST (b) HFSS.

Les diagrammes de rayonnement du gain en 3D des deux logiciels sont représentés respectivement sur les figure III.17a et figure III.17b. Les deux logiciels présentent des valeurs proches avec une différence de 0.39 dB.

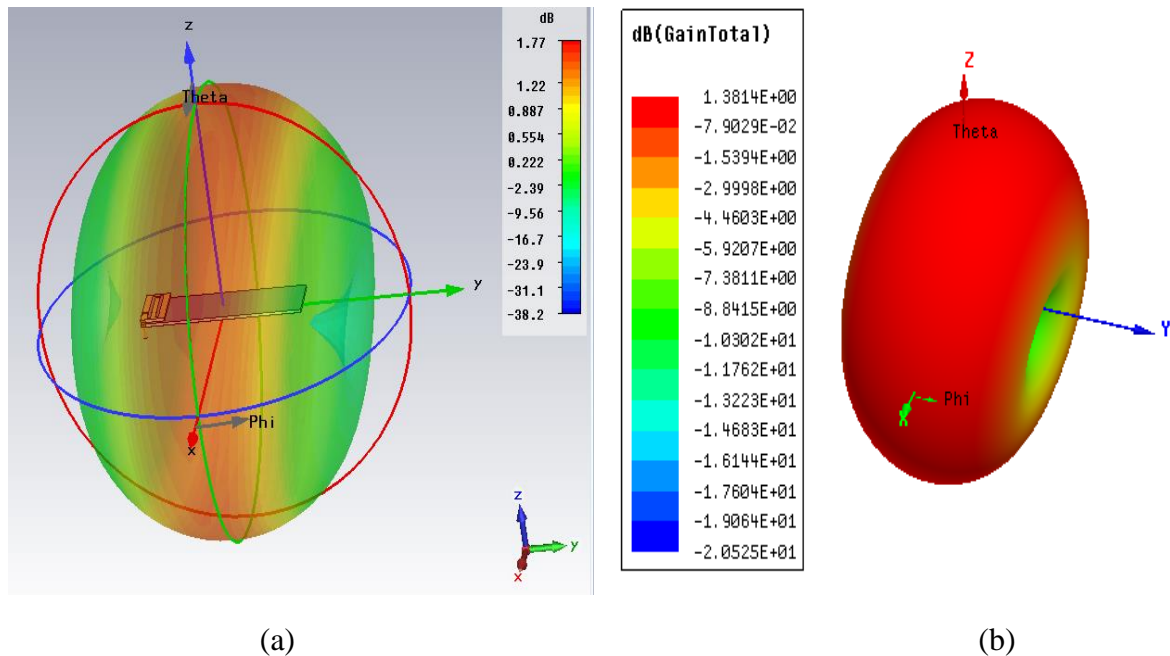


Figure III.17 - Diagramme de rayonnement du gain en 3D (a) CST (b) HFSS.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé la mise en œuvre de la conception de trois topologies d’antennes LoRa qui fonctionnent toutes sur la bande 868 MHz. Nous avons conçu en premier temps une antenne pifa avec des dimensions correspondants exactement à $\lambda/4$, Puis dans un second temps nous avons miniaturisé cette antenne pifa en utilisant plusieurs techniques, pour parvenir d’abord, à une miniaturisation de 30% de la taille de l’élément rayonnant en utilisant une topologie sous forme de méandre et finir, par obtenir une miniaturisation de 50% en utilisant cette fois-ci une topologie qui consistais à inséré une fente sur l’élément rayonnant. Les logiciels HFSS et CST nous ont permis de faire la conception , la simulation, et l’optimisation des performances de ces différentes antennes.

Les performances ainsi obtenues pour les antennes en termes de coefficient de réflexion, de gain et du diagramme de rayonnement s’avère satisfaisantes. Nous concluons que le type du substrat, l’espace air entre le patch et le substrat, la position de la ligne d’alimentation (le câble coaxial) influent considérablement sur les performances de l’antenne. Ainsi, Les

Chapitre III

Conception et miniaturisation des antennes PIFA

structures proposés offrent suffisamment de performance pour garantir leur utilisation dans une grande majorité des objets connectés opérant dans la bande de 868 MHz de la technologie LoRaWAN.

Conclusion général

Dans ce mémoire, nous avons présenté nos travaux de recherches sur la conception, l'analyse et l'optimisation d'antennes PIFA miniatures fonctionnant à la fréquence 868MHz, couvrant plusieurs normes de communications sans fil. Ces antennes sont destinées à être intégrées dans des objets connectés pour application aux réseaux LPWAN. En effet, la technologie de l'Internet des Objets s'est développée rapidement ces dernières années, ce qui est principalement dû à la mise en place de nouvelles solutions de connectivité longue distance, à bas débit et à faible consommation d'énergie. La mise en place de ces nouveaux réseaux LPWAN, élargit les domaines d'application de l'Internet des Objets, rendant cette technologie incontournable sur le marché des télécommunications.

L'objectif principal de ce manuscrit est d'apporter des solutions à divers problèmes spécifiques liés à l'encombrement, aux interférences électromagnétiques et aux débits de transmission en explorant le potentiel offert par le développement de solutions originales et prometteuses. Tout d'abord, l'étude de l'état de l'art nous a permis non seulement d'énumérer quelques technologies réparties dans le paysage de l'IoT, mais également de présenter plusieurs notions fondamentales de base permettant de comprendre leur théorie tout en se concentrant sur les standards de base des réseaux LPWAN notamment SigFox et LoRaWAN. En second lieu nous nous sommes consacrés à l'étude des antennes LPWAN pour application aux objets connectés en mettant en évidence une étude sur les antennes imprimées en commençant par les caractéristiques générales des antennes et énumérer les différentes techniques d'alimentation. Ensuite nous nous sommes intéressés à l'étude des antennes PIFA en passant par une analyse approfondie sur les antennes miniatures, l'effet de miniaturisation sur les paramètres des antennes ainsi que sur les techniques de miniaturisation. Et enfin pour clôturer notre travail nous nous sommes orientés vers la conception, la simulation, la miniaturisation et l'évaluation des performances des antennes pour les objets communicants sur le réseau LPWAN tout en opérant à la fréquence 868 MHz. Avant d'entamer la miniaturisation nous avons choisi une démarche qui consiste en premier lieu à concevoir une antenne PIFA LoRa rayonnant à une fréquence de 868MHz tout en faisant une étude paramétrique sur ses différentes caractéristiques. Puis nous sommes passés à la miniaturisation qui consistait à réduire la taille de l'élément rayonnant suivant des techniques données dans la littérature. Pour atteindre notre objectif, nous avons d'abord proposé un premier exemple d'antenne miniaturisé à 30% tout en évaluant ces performances radio. Pour

Conclusion général

aller encore plus loin dans la miniaturisation nous avons proposé un deuxième exemple qui correspond exactement à une réduction de 50% sur la taille de l'élément rayonnant. Enfin, l'analyse des résultats montrent une meilleure adaptation des antennes miniatures pour l'application LoRa 868 MHz en terme de gain, de diagramme de rayonnement et de coefficient de réflexion.

Perspectives

Toutes les structures présentées dans ce manuscrit ont globalement montré des performances (gain et coefficient de réflexion) adaptées à l'application LoRaWAN, même si des améliorations peuvent être apportées, notamment en ce qui concerne l'amélioration des performances de l'antenne miniature (gain, efficacité).

Références bibliographiques

- [1] B. YAHIAOUI et A. SFAÏHI, « Technologie RFID : Étude et application » Béjaïa, 2014/2015.
- [2] THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR. Yassin Belaizi, « Etude et conception d'un capteur-RFID passif en bande » Université de Montpellier, Montpellier, 30 novembre 2018.
- [3] M. Jeangeorges, THESE DE DOCTORALE, « Conception d'antennes miniatures, » Université Nice Sophia Antipolis, Nice, 8 dec 2010.
- [4] Georges, « matooma » 16 Sept 2020. [En ligne]. Available: <https://www.matooma.com/fr/s-informer/actualites-iot-m2m/m2m-comment-connecter-vos-objets>. [Accès le 15 Avril 2021].
- [5] A. Géron, WiFi professionnel, La norme 802.11, le déploiement, la sécurité, PARIS: DUNOD, 2004,2006,2009.
- [6] « Telecom evolution » [En ligne]. Available: <https://www.telecom-evolution.fr/fr/formations-courtes/technologies-de-connectivite-longue-portee-lpwan-lte-m-nb-iot-5g>. [Accès le 16 Avril 2021].
- [7] C. D, « Génération nouvelles technologies » 17 Decèmbre 2020. [En ligne]. Available: <https://www.generation-nt.com/lpwan-definition-reseau-iot-actualite-1983146.html>. [Accès le 16 Avril 2021].
- [8] S. Chaudhari, M. Zennaro et S. Borka, « LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations » *Future Internet*, pp. 12-46, 2020.
- [9] A. JUTON, « Réseaux très basse consommation, longue portée, bas débit, l'exemple de LoRaWAN, » *Revue 3EI*, pp. 3-12, 30 Septembre 2019.
- [10] R. Chahinez et O. D. Djanet, « Applications de la technologie LPWAN dans les systèmes de transport intelligent, » Université de Tlemcen, Tlemcen, 2020.
- [11] G. Strazdins, A. Elsts, K. Nesenbergs et L. Selavo, « Wireless Sensor Network Operating System Design Rules Based on Real-World Deployment Survey, » *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 2, n° 13, pp. 509-556, 2013.
- [12] F. J. Oppermann, C. A. Boano et K. Römer, « A Decade of Wireless Sensing Applications: Survey and Taxonomy » pp. 11-50, 2014.

- [13] I. DEMirkol, C. Ersoy et F. Alagoz, « Mac protocols for wireless » *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, n° 14, pp. 115-121, 2006.
- [14] U. Raza, P. Kulkarni, et M. Sooriyabandara, « Low Power Wide Area Networks: An Overview » pp. 3-4, 11 Jan 2017.
- [15] « Cellular networks for massive iot: Enabling low power wide, » *Ericsson, Tech.*, Janvier 2016.
- [16] « LoRa Alliance Technical Marketing Workgroup » *A technical Overview of LoRa and LoRaWAN*, Novembre 2015.
- [17] Hashem, N. Tsavalos et A. Abu, *Low Power Wide Area Network (LPWAN) Technologies for Industrial IoT Applications*, Lund, suède: Faculty of Engineering, LTH, Lund University, 2018.
- [18] S. BOUZEFRANE, « Le réseau LoRaWAN ». *Conservatoire National des Arts et Métiers*.
- [19] « Forum de l'énergie de Bautzen » *Mise en œuvre technique des compteurs intelligents*, pp. http://www.tgz-bautzen.de/fileadmin/media/pdf/Energieagentur/Veranstaltungen/4._Energieforum/02_Heidrich_Oswald_BA.pdf, Mars 2017.
- [20] J. DENÉCHAUD, « Rapport de projet de fin d'étude sécurité de l'Internet des Objets,» 2017.
- [21] S. MONTAGNY, *LoRa et LoRaWAN pour l'Internet des Objets*, Paris: Université savoie Mont blanc, <https://lms.fun-mooc.fr/> 2021.
- [22] « SEMTECH Corporation » *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*, 2015.
- [23] T. BOUGUERA, *Projet de thèse : Capteur Communicant Autonome en Energie pour l'IoT*, Nante: Université de Nante, 2019.
- [24] Balint, K. MATTHEW et SEEBER, « Decoding LoRa » *Realizing a modern LPWAN*, 2016.
- [25] S. SigFox, *Présentation Technique de SigFox*, 2017.
- [26] Aashem, N. Tsavalos et A. Abu, *Low power Wide Area Network (LPWAN) Technologies for industrial IoT Applications*, Lund (Sweden): Lund University, 2018.
- [27] G. Paquet, « Linux Embedded » *Blog des technologies libres et embarquées*, 27 Mars 2020. [En ligne]. Available: <https://linuxembedded.fr/2020/03/introduction-a-sigfox>. [Accès le 19 Avril 2021].

- [28] KEITH R. CARVER, and JAMES W. MINK, “Microstrip Antennas Technology,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, No. 1, January 1981.
- [29] « LoRa Alliance Technical Committee LoRaWAN, » *LoRaWAN 1.1 Specification*, 11 Octobre 2017.
- [30] Constantine. A. Balanis, John Wiley et Sons, « Antenna Theory- Analysis and Design, New York », 1997.
- [31] Prof B. K. Kanaujia, Dr S. K. Gupta, Dr. J. Kishor, et Dr. D. Gangwar, « Printed Antennas Theory and Design », Boca, Raton, London and New York: CRC Press, 2021.
- [32] ZHANG Y-P, LO T.K-C et HWANG Y-M, « Dielectric-Loaded Miniature Antenna for Microcellular and Personal Communications, » *Proceedings IEEE, AP-Symp*, pp. 1152-1155, 1995.
- [33] A. THIOR A-C LEPAGE, et X. BEGAUD, « Directive and Ultra Wideband Antenna on a high Impedance Surface », Berlin, Allemagne: EuCAP 2009, 2009.
- [34] G. KOSSIAVAS A. PAPIERNIK, « The C-Patch: A Small Microstrip Element, » *IEE Electronics Letters*, vol. 25, n° 14, pp. 253-254, 16 Février 1989.
- [35] P. CIAIS, R. STARAJ, G. KOSSIAVAS et C. LUXEY, « Design of an Internal Quad-Band Antenna for Mobile Phones » *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, n° 14, pp. 148-150, Avril 2004.
- [36] K. HIRISAWA et M. HANEISHI, *Analysis, Design and Measurement of small and Low-Profile Antennas*, Ed. Artech House, ISBN: 0-89006-486-5, 2002.
- [37] Xavier Begaud « Les antennes Ultra Large Bande de » 01 mai 2010
- [38] G. KOSSIAVAS, *Miniaturisation et intégration d’antennes imprimées pour systèmes communicants ULB pulsés*, Nice: l’Université de Nice-Sophia Antipolis, 2011.
- [39] IDRISSE, Pr N. El AMRANI, *Conception d’une antenne ‘‘PIFA’’ multibandes pour applications sans fil*, 2016.
- [40] C. FAROUK, *Etude et Modélisation des Antennes Miniatures basée sur des matériaux électriques*, Setif: Université de Setif-1, 2018.
- [41] M. HARBADJI, *Contribution à l’étude des antennes miniatures multi-bandes*, Constantine: Université de Constantine, 2018.
- [42] B. Nassima, *CONCEPTION DES ANTENNES PIFA MONO-BANDE ET MULTI-BANDES GSM, DCS, PCS, UMTS ET WIFI*, Tlemcen: L’UNIVERSITÉ DE TLEMCCEN, 2013.

- [43] H. A. WHEELER, « The radiansphere around a small antenna, » Proceedings IRE, pp. 1325-1331, August 1959.
- [44] UIT-R, Aspects techniques et opérationnels des réseaux de faible puissance à couverture étendue pour les communications de type machine et l'Internet des objets dans les gammes de fréquences harmonisées, 2018.
- [45] P. Pinault, « disk91.com » 2020. [En ligne]. Available: <https://www.disk91.com/2020/cours/iot-overview-2020-update/>. [Accès le 6 Mai 2021].
- [46] H. A. Wheeler, « Fundamental Limitations of Small Antennas, » Proceedings of IRE, vol. 35.
- [47] H.T Nguyen, S. Noghianian, et L. Shafai, « Microstrip patch antenna miniaturization by slots loading, » IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 215-218, 2005.
- [48] S. Maci, G. Biffi Gentili, P. Piazzesi et C. Salvador, « Dual-band slot-loaded patch antenna, » Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, pp. 225-232, juin 1995.
- [49] F. Ferrero et L. Lizzi, « Use of ultra-narrow band miniature antennas for internet-of-things applications, » Electron. Lett, vol. 51, pp. 1964-1966, 2015.
- [50] H. CHORFI, CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTÈME D'ANTENNE RÉSEAU CONFORME EN ONDE, Québec: université du Québec, Mai 2012.
- [51] J. R. Mosig, F. Gardiol, "Technique analytique et numériques dans l'analyse des antennes microruban ", ANN. Télécom, 40, n°7-8, 1985.
- [52] Constantine. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005.

Annexes**Annexe I : Simulateur CST Microwave studio**

Dans la conception des antennes, l'utilisation d'un simulateur électromagnétique se révèle fondamentalement pour réduire les coûts liés à la réalisation et à la mesure. Les résultats de simulation qui sont présentés dans ce mémoire sont issus principalement du logiciels CST Studio.

Présentation

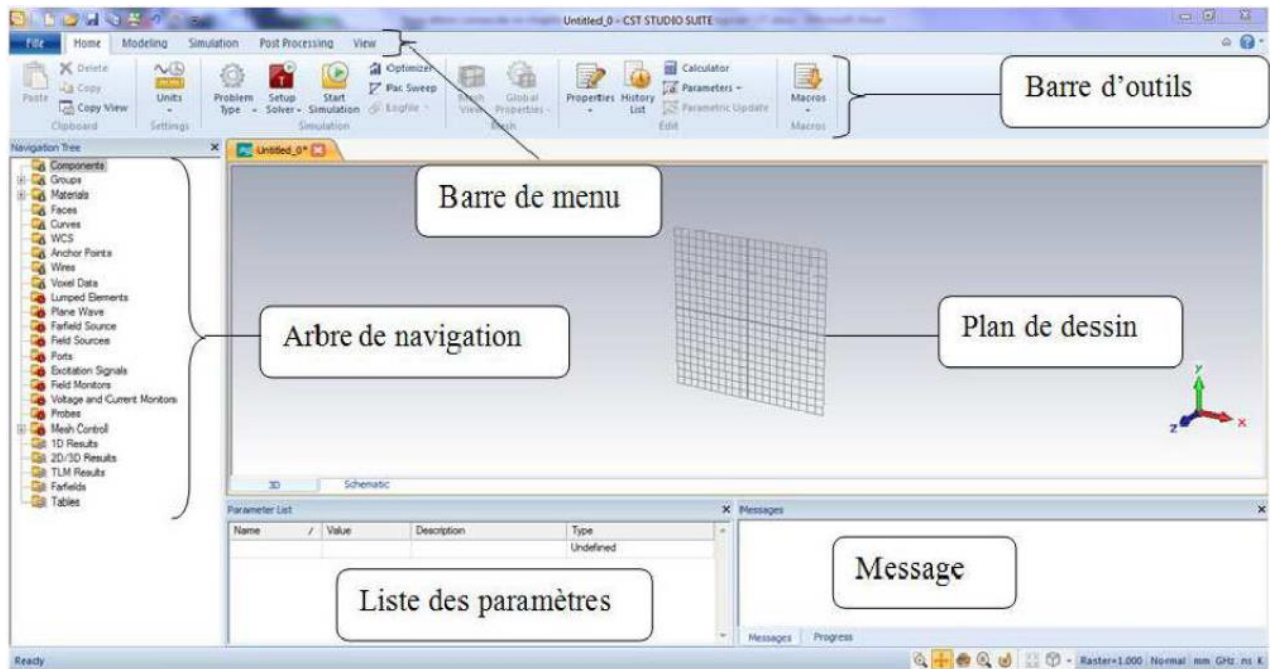
Le logiciel CST Studio est un simulateur électromagnétique basé sur la technique des intégrations finis (FIT). Cette méthode numérique fournit un arrangement spatial de discrétisation, applicable à des divers problèmes électromagnétiques, s'étendant du calcul des champs statiques aux applications haute fréquence dans le domaine temporel ou fréquentiel. À la différence de la plupart des méthodes numériques, FIT discrétise spatialement les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Afin de résoudre ces équations numériquement, un domaine fini, de calcul est défini. L'espace est donc divisée en cellules élémentaires. Le maillage généré est donc volumique et chaque cellule du maillage est cubique. L'outil de résolution temporelle remplace les dérivées partielles par des différentielles. Cet outil de résolution dans le domaine temporel est très avantageux en termes de temps de calcul [50].

**Module CST utiliser :**

Il existe plusieurs modules d'exécution sur CST studio mais notre travail a été exécuté sur le module CST design studio. Ainsi c'est une plate-forme universelle pour gérer les processus de conception d'un système complexe. L'utilisateur peut analyser le comportement du système complet en petits segments en construisant des sous-systèmes élémentaires.

Interface CST

Après la création du projet, on accède à l'interface dans laquelle se fait la conception de l'antenne et en suite on peut lancer la simulation pour visualiser les paramètres de l'antenne. L'interface est constituée par plusieurs champs comme présenter dans la figure suivante :



- ✓ Dans l'entête de l'interface, ce trouve une barre d'outils qui est un ensemble de raccourcis de la barre de menu.
- ✓ Dans la partie gauche de l'interface, nous avons ainsi l'arbre de navigation à travers lequel on peut accéder aux éléments structuraux et aux résultats de simulation.
- ✓ Au centre de l'interface se trouve le plan de travail.
- ✓ Au pied de l'interface, nous avons :
 - La liste des paramètres ou dimension de l'antenne où on trouve les variables utilisées pendant la simulation.
 - Le message qui informe si chaque étape est simulée avec succès. Dans le cas contraire, un message d'erreur apparait. On peut aussi voir la progression lors d'une simulation.

Calcul des Résultats

✓ Coefficient de réflexion

Après la simulation pour observer les résultats du coefficient de réflexion ou le paramètre S11 il faut suivre les étapes suivantes : arbre de navigation /1D results/S-parametres. Le S11 en dB est tracé en fonction de la fréquence et qui caractérise la quantité de puissance réfléchiée par l'antenne.

✓ **Le diagramme de rayonnement et gain**

Toujours après la simulation pour visualiser le diagramme de rayonnement et le gain le chemin suivant est emprunté : arbre de navigation /farfield. Le diagramme de rayonnement et le gain peuvent être observés en 3D, 2D et les composantes du champ E et champ H peuvent être vérifiées en polaire.

Annexe II : Simulateur ANSYS HFSS

Dans la conception des antennes, l'utilisation d'un simulateur électromagnétique se révèle fondamentalement pour réduire les coûts liés à la réalisation et à la mesure. Les résultats de simulation qui sont présentés dans ce mémoire sont issus principalement du logiciel CST Studio.

Présentation

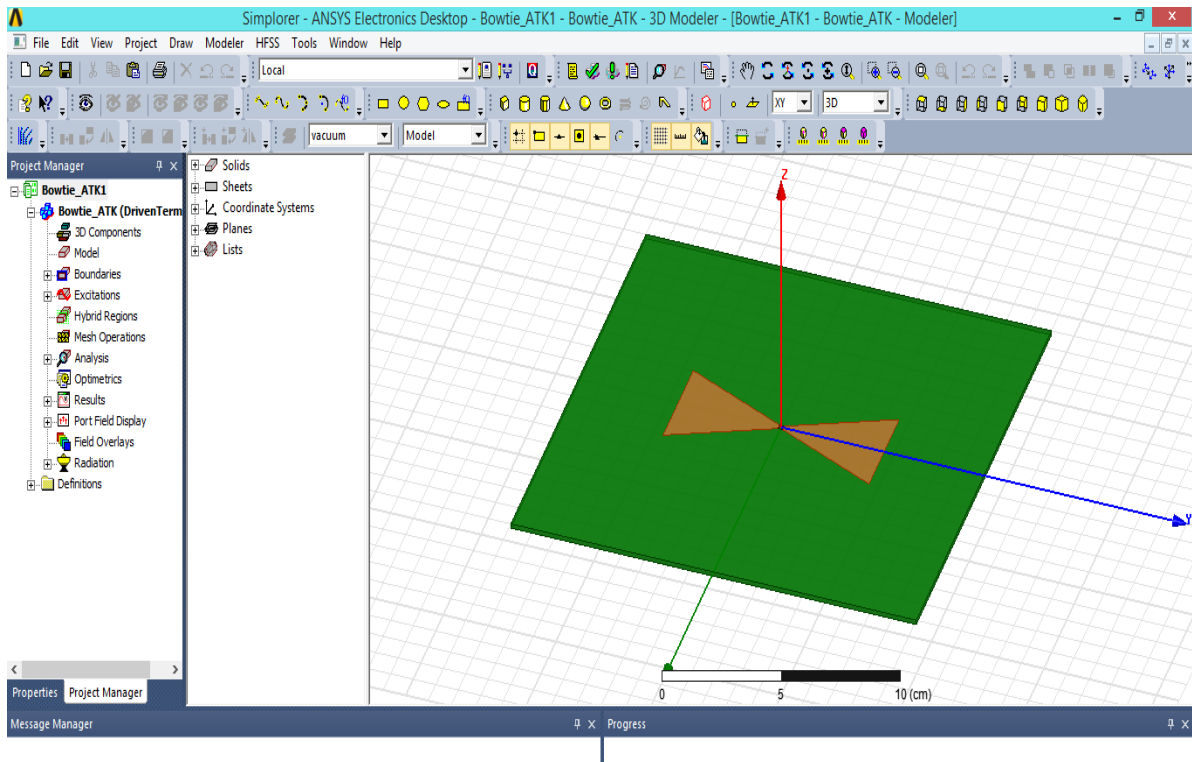
L'ANSYS HFSS est un logiciel commercial, tridimensionnel et d'éléments finis. Il utilise la méthode FEM des éléments finis pour avoir des résultats qui se répètent pour une variété de structures complexes. Il est aussi utilisé pour modéliser des circuits ayant des plans de masse finis, des formes aléatoires et des matériaux différents.

Il possède une interface graphique où l'on peut concevoir la structure désirée, configurer les caractéristiques de chaque objet (dimensions matériaux etc...) et les ports d'excitation. Une fois le modèle soit disposé, la structure est validée et simulé pour obtenir les caractéristiques de rayonnement. Son interface graphique est similaire à celle du CST, qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure tout en permettant une simulation 2D et 3D.

Interface HFSS

Après la création du projet, on accède à l'interface dans laquelle se fait la conception de l'antenne et en suite on peut lancer la vérification des conditions aux limites et le point d'excitation pour visualiser.

L'interface est présentée dans la figure suivante :



La méthode des éléments finis (FEM)

HFSS utilise La méthode des éléments finis (FEM), cette méthode (parfois appelé aussi l'analyse par élément finis) est une technique numérique pour trouver des solutions par approximation des équations aux dérivées partielles (EDP), ainsi que des équations intégrales. Elle utilise aussi un maillage adaptatif et du graphisme superbe qui s'apprête à tous les problèmes électromagnétiques 3D. ANSYS HFSS peuvent être utilisé pour calculer des paramètres tels que les paramètres S Y, Z, la fréquence de résonance et les champs rayonnés [51].