



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique



MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER EN TELECOMMUNICATION

Spécialité : Système des Télécommunications

Présenté par

IDRISSA OGUE Abdoulrachid

BOUDAOU D Chourouk Yamina

Intitulé du sujet

Etude de la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-
idéaux : Cas de transmissions Indoor

Soutenu le 04/07/2023 devant le jury composé de :

Président: M. SOLTANE BENALLOU Abdelkader

MAA Université de Mostaganem

Examinatrice : Mme BENCHELLAL Amel

MCB Université de Mostaganem

Rapporteur: M. ABED Mansour

MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord nous rendons grâce à Dieu, lui qui nous a permis d'être bien portant afin d'effectuer ce travail du début jusqu'à la fin.

Nous remercions nos parents respectifs pour leurs soutiens durant notre parcours de formation.

Nos remerciements vont, à notre directeur de mémoire, le professeur M. Abed Mansour, qui nous a guidés avec ses orientations, ses conseils et ses critiques tout au long de ce travail de recherche en nous laissant la liberté dont on avait besoins. On ne peut que lui être reconnaissant surtout pour ses qualités intellectuelles et humaines.

Nos remerciements vont aussi au membre du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance.

Et enfin, nous sommes reconnaissants envers tous les enseignants d'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Pour leur contribution à notre formation.

Dédicaces

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études.

Mes chers frères et amis de loin ou de près, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.

A mon binôme Abdoulrachid.

Je vous remercie tous.

Chourouk Yamina

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'études, aux personnes qui me sont les plus chères :

A mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments les plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés pour moi.

A mes frères pour leurs encouragements.

A mes amis.

Abdoulrachid

Résumé

Les réseaux sans fils jouent un rôle très important dans nos activités quotidiennes ; l'interruption des services qu'ils fournissent, ou même une dégradation significative de leur qualité, deviennent de moins en moins acceptables.

Dans ce mémoire, la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux est étudiée, examinée et discutée. En effet, comme tout signal radio, les signaux Wi-Fi subissent lors de leur propagation à travers le canal des réflexions, réfractions et diffusions à causes des différents obstacles en plus des interférences Wi-Fi et non Wi-Fi en particulier dans la bande de 2.4 GHz. Ces sources de dégradation sont évaluées à travers des simulations et des mesures pratiques avec l'application WIFI Analyzer permettant la détection des canaux Wi-Fi les moins encombrés et également ceux fournissant la meilleure qualité du signal Wi-Fi reçu en termes de puissance de réception et débit binaire.

Cette étude a pour objectif d'analyser l'impact des canaux non-idéaux sur les transmissions Wi-Fi dans les environnements intérieurs, proposer des modèles spécifiques adaptés à ces conditions, développer des techniques pour atténuer les interférences et améliorer la couverture du signal grâce à l'utilisation d'antennes adaptatives ou encore l'optimisation efficace de la puissance de transmission et du positionnement des modems. Ces recherches contribuent grandement à améliorer le rendement et la fiabilité des réseaux Wi-Fi dans les milieux indoor offrant ainsi aux utilisateurs une connectivité plus stable et plus satisfaisante. De plus, elles permettent à mener des études plus avancées sur l'optimisation du nombre de point d'accès et de leur emplacement pour une meilleure connectivité à moindre coût que ce soit en termes d'équipements, installation et maintenance ou de consommation de l'énergie électrique.

Mots Clés : Wi-Fi, Dégradation, Canaux non-idéaux, Affaiblissement, Onde Electromagnétique.

Abstract

Wireless networks play a very important role in our daily activities; the interruption of the services they provide, or even a significant degradation of their quality, are becoming less and less acceptable.

In this thesis, the degradation of Wi-Fi signals in non-ideal channels is studied, examined and discussed. Indeed, like any radio signal, the Wi-Fi signals undergo during their propagation through the channel reflections, refractions and diffusions because of the various obstacles in addition to Wi-Fi and non-Wi-Fi interferences in particular in the frequency band of 2.4 GHz. These sources of degradation are evaluated through simulations and practical measurements using the WIFI Analyzer application allowing the detection of the least congested Wi-Fi channels and also those providing the best quality of the received Wi-Fi signal in terms of reception power and the available bit rate.

The main objective of this study is to analyze the impact of non-ideal channels on indoor Wi-Fi transmissions, propose specific models adapted to these conditions, develop techniques to mitigate interferences and improve signal coverage through the use of adaptive antennas and efficient optimization of transmission power and modems' location. This research greatly contributes to improving the performance and reliability of Wi-Fi networks in indoor environments, thus offering users a more stable and satisfactory connectivity. In addition, they allow more advanced studies to be carried out on the optimization of the number of access points and their location for better connectivity at a lower cost, whether in terms of equipment, installation and maintenance or power consumption.

Keywords: Wi-Fi, Degradation, Non-ideal Channels, Attenuation, Electromagnetic Wave

ملخص

تلعب الشبكات اللاسلكية دورًا مهمًا جدًا في أنشطتنا اليومية؛ إذ أصبح انقطاع الخدمات التي تقدمها، أو حتى التدهور الكبير في جودتها، أمرًا أقل قبولًا.

في هذه المذكرة، يتم دراسة وفحص ومناقشة تدهور إشارات الواي فاي في القنوات غير المثالية. في الواقع، مثل أي إشارة لاسلكية، تخضع إشارات الواي فاي أثناء عبورها للأوساط لعدة تأثيرات من انعكاسات و انكسارات وانتشارات جزئية بسبب العوائق المختلفة إضافة إلى تداخلات مع شبكات الواي فاي المحيطة و إشارات غير الواي فاي، على وجه الخصوص في نطاق 2.4 جيجا هرتز. يتم تقييم مصادر التدهور هذه من خلال عمليات المحاكاة والقياسات العملية باستخدام تطبيق WiFi Analyzer الذي يسمح باكتشاف قنوات الواي فاي الأقل ازدحامًا وأيضًا تلك التي توفر أفضل جودة للإشارة المستقبلية من حيث قوة الاستقبال و سرعة التدفق.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير القنوات غير المثالية على عمليات الإرسال في البيئات الداخلية، اقتراح نماذج محددة تتكيف مع هذه الظروف وتطوير تقنيات لتخفيف التداخل وتحسين تغطية إشارة الواي فاي من خلال استخدام الهوائيات التكميلية أو التحسين الفعال لقدرة الإرسال والتحديد المدروس لمواقع نقاط الوصول. يساهم هذا البحث بشكل كبير في تحسين أداء وموثوقية شبكات الواي فاي في البيئات الداخلية، مما يوفر للمستخدمين اتصالاً أكثر استقرارًا وأكثر إرضاءً. بالإضافة إلى ذلك، فهو يسمح بإجراء دراسات أكثر تقدمًا تتعلق بالتحديد الأمثل لعدد نقاط الوصول و توقعها بغرض تحسين الاتصال بتكلفة أقل، و هذا سواء من حيث المعدات أو التركيب والصيانة أو استهلاك الطاقة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الواي فاي، تدهور الإشارة، قنوات الاتصال غير المثالية، التخادم، الموجات الكهرومغناطيسية

Table des Matières

Remerciements	2
Dédicace.....	3
Dédicace.....	4
Résumé	5
Abstract	6
Résumé en Arabe.....	6
Table des Matières	8
Liste des Figures	11
Liste des Tableaux.....	13
Liste des Abréviations	14
Introduction Générale.....	16
Chapitre I.....	19
I.1. Introduction	20
I.2. L’architecture cellulaire.....	20
I.2.1. Mode infrastructure	20
I.2.2. Mode Ad-hoc.....	22
I.3. Les principales normes du Wifi.....	23
I.3.1. Bandes de fréquence.....	25
I.3.2. Supports de transmission du Wi-Fi	25
I.3.2.1. Infrarouge	25
I.3.2.2. Fréquences radio.....	25
I.4. Principe générale de transmission de données sur Wifi.....	25
I.5. Les protocoles du réseau Wifi.....	26
I.5.1. La couche physique	26
I.5.1.1. Le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) ou Etalement de spectre par saut de fréquence	26
I.5.1.2. Le DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	26

I.5.1.3. IR (Infrarouge).....	27
I.5.1.4. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	27
I.5.2. La couche liaison de données	28
I.6. Les Techniques d'accès	29
I.6.1. Le protocole CSMA/CD.....	29
I.6.2. Le protocole CSMA/CA.....	29
I.6.3. La réservation RTS/CTS et le problème de la station cachée	30
I.7. Conclusion	31
Chapitre II	32
II.1. Introduction	33
II.2. Atténuation des signaux radiofréquences (RF).....	33
II.2.1. Définition	33
II.2.2. Formules physiques de l'atténuation.....	34
II.2.2.1. Atténuation d'espace ("path loss"):.....	34
II.2.3. Propagation en espace libre.....	35
II.3. Canal de propagation	36
II.3.1. Définition du canal de propagation	36
II.3.2. Modèles de l'atténuation	36
II.3.2.1. Modèle d'atténuation à l'air libre	36
II.3.2.2. Modèle de propagation extérieure	36
II.3.2.3. Modèle de diffraction par les toits	37
II.3.2.4. Modèle de diffraction par toits plats.....	37
II.3.3. Différents obstacles des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux.....	38
II.3.3.1. La réflexion/réfraction	38
II.3.3.2. La diffraction	38
II.3.3.3. La diffusion.....	39
II.4. Effets pratiques des interférences Wi-Fi et non Wi-Fi sur les émetteurs Wi-Fi actifs 40	
II.4.1. Interférences par des dispositifs Wi-Fi (interférences couche 2).....	41
II.4.2. Interférences par des dispositifs non Wi-Fi (interférences couche 1).....	41
II.5. Conclusion	43

Chapitre III.....	43
III.1. Introduction.....	45
III.2. Simulations de la dégradation des signaux Wi-Fi par MATLAB	45
III.2.1. Principales fonctionnalités du MATLAB	45
III.2.2. Simulations.....	46
III.2.2.1. Simulation 1 : Cas d'interférences Wi-Fi entre canaux 1 et 2 en présence de bruit	47
III.2.2.2. Simulation 2 : Cas d'interférences Wi-Fi entre canaux 9, 10, 11 et 12 en présence du bruit	48
III.2.2.3. Simulation 3 : Cas de canaux non-idéaux (fading channels) en présence de bruit	49
III.3. Mesures pratiques de dégradations par le WiFi Analyzer.....	50
III.3.1. Aperçu sur l'application WiFi Analyzer	50
III.3.2. Fonctionnalités du WiFi Analyzer	50
III.3.3. Tests pratiques et discussions.....	51
III.3.3.1. Scénario 1 : Dégradation des signaux Wi-Fi en espace libre.....	52
III.3.3.2. Scénario 2: Effets de deux murs en brique	54
III.3.3.3. Scénario 3 : Effets de trois murs en brique	56
III.3.3.4. Scénario 4 : Effets d'obstacles en métal	58
III.3.3.5. Scénario 5 : Effets des interférences Wi-Fi (couche 1)	60
III.3.3.6. Scénario 6 : Effets des interférences non Wi-Fi (couche 2)	62
III.4. Conclusion	64
Conclusion générale et recommandations pour les projets futurs	66
Références Bibliographiques.....	68

Liste des Figures

Figure I-1: Fonctionnement d'un BSS [1].....	21
Figure I-2 : Réseau Wi-Fi en mode infrastructure[1].....	21
Figure I-3 : Réseau Wi-Fi en mode Ad-hoc[1].....	22
Figure I-4 : Exemple d'un BSS [1].....	22
Figure I-5: Fonctionnement d'un DSSS.....	27
Figure I-6: Fonctionnement d'un OFDM [2].	27
Figure I-7: Processus de transmission des trames [5].....	30
Figure I-8: Transmission en utilisant les trames RTS/CTS [7].....	31
Figure II-1 : Effets et conséquences possibles de la dynamique du canal [14].....	36
Figure II-2 : Modèle de propagation Extérieur [10].....	37
Figure II-3 : Modèle de diffraction par les toits[10].	37
Figure II-4 : Modèle de diffraction par toits plats[11].....	38
Figure II-5 : La capacité des ondes à traverser les matériaux [14].....	39
Figure II-6 : Interférences co-canal (co-channel interference CCI) causées par des signaux provenant de points d'accès qui se chevauchent (phénomène plus fréquent pour le 2.4 GHz).	42
Figure II-7 : Exemple de sources d'interférences non Wi-Fi.	42
Figure III-1 : Résultats de la simulation 1 : Représentations temporelles	47
Figure III-2 : Résultats de la simulation 1 : Représentations fréquentielles	47
Figure III-3 : Résultats de la simulation 2 : Représentations temporelles.	48
Figure III-4 : Résultats de la simulation 2 : Représentations fréquentielles.....	48
Figure III-5 : Résultats de la simulation 3 : (a) Signal Wi-Fi émis, (b) signal Wi-Fi reçu dégradé par le canal non-idéal à évanouissement par trajets multiples et (c) Spectre du signal en (b).	49
Figure III-6 : Paramètres WLAN du modem LC522V.....	51
Figure III-7 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (Scénario 1).	53
Figure III-8 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et leur qualité (Scénario 1). .	53
Figure III-9 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 1)	53
Figure III-10 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (Scénario 2).....	55

Figure III-11 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 2)..... 55

Figure III-12 : Affichage des canaux utilisés de CH1 à CH 13 et de leur qualité (Scénario 3).
..... 58

Figure III-13 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 3)..... 58

Figure III-14 : Affichage des canaux utilisés de CH1 à CH 13 et d leur qualité (Scénario 4).
..... 60

Figure III-15 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun de points d'accès actifs (scénario 4)..... 60

Figure III-16 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (scénario 5).
..... 62

Figure III-17 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi de chacun de points d'accès actifs (scénario 5)..... 62

Figure III-18 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (scénario 6).
..... 63

Figure III-19 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi de chacun de points d'accès actifs (scénario 6)..... 63

Liste des Tableaux

<i>Tableau I-1 : Récapitulatif des normes 802.11 [6].</i>	23
<i>Tableau I-2 : Récapitulatif des normes 802.11 suite [6].</i>	24
<i>Tableau II-1 : Evolution de l'atténuation des matériaux dans la gamme 2,4 GHz [8].</i>	34
<i>Tableau III-1 : Caractéristiques des 13 canaux dans le standard 802.11n [18].</i>	46
<i>Tableau III-2 : Caractéristiques du périphérique LC 522V.</i>	51
<i>Tableau III-3 : Paramètres des mesures RF du scénario 1.</i>	53
<i>Tableau III-4 : Effets de deux murs en brique (scénario 2).</i>	55
<i>Tableau III-5 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 2).</i>	55
<i>Tableau III-6 : Effets de trois murs en brique (scénario 3).</i>	57
<i>Tableau III-7 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 3).</i>	57
<i>Tableau III-8 : Effets d'obstacles en métal (scénario 4).</i>	59
<i>Tableau III-9 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 4).</i>	59
<i>Tableau III-10 : Effets des interférences Wi-Fi couche 1 (scénario 5).</i>	60
<i>Tableau III-11 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 5). Le réseau A.I.O.DZ est l'interférant.</i>	61
<i>Tableau III-12 : Effets des interférences non Wi-Fi couche 2 (scénario 6).</i>	63
<i>Tableau III-13 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 6).</i>	63

Liste des Abréviations

A

AES: Advanced Encryption Standard
ACK: Acknowledgement
AP: Access Point

B

BSS: Basic Service Set
BSSID: Basic Service Set Identifier

C

CSMA/CD: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CSMA/CA : Carrier Sens Multiple Access/Collision Avoidance
CCA: Clear Channel Assessment

D

DS: Distribution System
DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
DCF: Distributed Coordination Function
DIFS: DCF IFS
DAB: Digital Audio Broadcasting
DVB: Digital Video Broadcasting

E

EM: Electro-Magnétique
ESS: Extendeds Service Set

F

FSPL: Free Space Path Loss
HHT-OFDM: Hybrid High Throughput Orthogonal frequency division Multiplex
HR/DSSS: High Rate Direct Sequence Spread Spectrum

I

ISM: Industrial, Scientific and Medical
IR: InfraRouge
IFS: Inter-Frame Spacing

L

LTE: Long Term Evolution

M

MIMO: Multiple Input Multiple Output

N

NAV: Network Allocation Vector

Liste des Abréviations

O

OFDM: Orthogonal frequency division Multiplex
OSI: Open System Interconnexion

P

PCF: Point Coordination Function
PIFS: PCF IFS
PLCP: Physical Layer Convergence Protocol
PMD: Physical Medium Dependent
PCS: Physical Carrier Sense

R

RTS: Ready to send

S

STA: Station de base
SISO: Single Input Single Output
SIG : Système Information Géographique

U

U-NII: Unlicensed National Information Infrastructure
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

V

VCS: Virtual Carrier Sense

W

Wi-Fi: Wireless Fidelity
WLAN: Wireless Local Area Network

Introduction Générale

Les réseaux sans fil ont été créés pour permettre aux utilisateurs d'effectuer des communications de telle sorte à garder la connectivité des équipements, tout en ayant gain de mobilité et sans avoir recours aux `fils' utilisés dans les réseaux traditionnels et qui encombrant ces derniers.

Ces dernières années, les technologies sans fil ont connues un essor considérable que ce soit au niveau commercial ou dans le domaine des recherches, ceci revient aux multiples avantages qu'elles offrent (mobilité, faible coûts, etc.). Mais, comparer aux interfaces filaires, peu nombreuses sont les interfaces sans fil qui offrent un débit rapide (ondes hertziennes, l'infrarouge).

Le Wi-Fi est devenu une technologie omniprésente dans notre vie quotidienne, permettant la connectivité sans fil à Internet pour nos smartphones, tablettes et ordinateurs portables. Cependant, peu de gens connaissent les normes IEEE 802.11 qui régissent le fonctionnement du Wi-Fi. Ces normes définissent les protocoles techniques utilisés par le réseau sans fil afin d'assurer une communication fluide et efficace entre les appareils connectés.

Dans ce mémoire, nous allons explorer en certaine profondeur ces normes IEEE 802.11 du Wi-Fi pour mieux comprendre leur importance dans l'utilisation quotidienne des réseaux sans fil modernes.

Cependant, malgré les avantages indéniables qu'offre le Wi-Fi, il est confronté à des défis inhérents liés à la dégradation des signaux dans les canaux non-idéaux. Les canaux non-idéaux font référence aux environnements où le signal Wi-Fi doit se frayer un ou plusieurs chemins à travers divers obstacles et perturbations. Ces dernières peuvent résulter de sources telles que d'autres réseaux Wi-Fi, des appareils électroniques, des obstacles physiques tels que les murs et les meubles, ainsi que du bruit électromagnétique ambiant et le bruit thermique au niveau du récepteur.

Lorsque les signaux Wi-Fi traversent ces canaux non-idéaux, ils sont sujets d'une dégradation de la qualité de la transmission, ce qui se traduit par des problèmes tels que des ralentissements, des pertes de paquets et des interruptions de la connectivité. Comprendre les causes de cette dégradation et trouver des solutions pour y remédier est essentiel pour assurer des performances optimales des réseaux Wi-Fi.

L'objectif de ce projet est d'étudier les sources et les effets des dégradations des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux dans un contexte de communications intérieures (indoor). La bande considérée dans ce travail est la bande Wi-Fi à 2.4 GHz.

Dans cette perspective, cette étude se penche sur les principaux facteurs qui contribuent à la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non idéaux. Nous explorerons les interférences provenant d'autres réseaux sans fil et dispositifs électroniques, l'atténuation du signal due aux obstacles physiques, les effets des réflexions et diffractions, ainsi que l'impact du bruit électromagnétique et du bruit thermique.

Des mesures pratiques ont été effectuées afin de valider les résultats annoncés dans la littérature en utilisant une application Android dédiée. Supportés par des simulations sur MATLAB, plusieurs scénarios ont été testés, analysés et discutés pour en arriver à une synthèse décrivant les solutions pratiques à adopter pour faire face à ces dégradations inévitables.

En somme, cette étude vise à explorer les défis de la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non idéaux et à proposer des solutions pour améliorer les performances des réseaux Wi-Fi dans des environnements complexes. En comprenant les facteurs clés et en mettant en œuvre des mesures appropriées, nous pourrions maximiser la qualité et la fiabilité des connexions Wi-Fi, répondant ainsi aux besoins croissants de connectivité sans fil dans notre société moderne.

Afin d'effectuer une étude détaillée sur la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux, notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre aborde le standard IEEE 802.11 ou son appellation commerciale Wi-Fi. Ce standard représente la technologie la plus utilisée aujourd'hui comme interface sans fil pour échanger des données. Ce chapitre présente aussi les aspects d'architecture, le format des trames ainsi que quelques extensions dérivées de ce standard.

Le second chapitre expose la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux en commençant par citer quelques obstacles et leur impact sur la dégradation des signaux radiofréquence, quelques phénomènes physiques qui ont des effets néfastes,

Le troisième chapitre illustre des simulations avec le logiciel Matlab et mesures pratiques des sources de dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux en utilisant l'application WIFI Analyzer. Les interférences Wi-Fi et non Wi-Fi ont été considérées.

Enfin nous concluons notre travail par des conclusions et des recommandations pour les projets futurs.

En comprenant les mécanismes sous-jacents de ces perturbations, nous pourrions développer des stratégies et des solutions efficaces pour améliorer la qualité des signaux Wi-Fi

dans des environnements non idéaux. Ces solutions peuvent inclure l'optimisation des paramètres des réseaux Wi-Fi, l'utilisation d'équipements adaptés, la sélection judicieuse des canaux de fréquence et l'application de techniques de réduction des interférences.

Chapitre I: Technologie Wi-Fi

I.1. Introduction

Wi-Fi est une technologie sans-fil mise au point en 1997. Elle utilise des bandes de fréquences hertziennes limitées et définies par les organismes de normalisation. Cette technologie assure la connexion de plusieurs appareils (ordinateurs portables ou de bureau, tablette, smartphone, imprimante, box) entre eux et à Internet dans l'espace libre sans aucun support filé tel que les câbles. La fréquence de fonctionnement se situe entre 2,4 GHz à 5 GHz.

Depuis la standardisation d'IEEE 802.11 en 1997 dont la vitesse passe à 11 Mbps contre 2 Mbps auparavant, ces types de réseaux ont commencé à rencontrer un véritable succès sans précédent. L'appellation WLAN désigne des dispositifs dont le rayon d'action ne dépasse pas quelques centaines de mètres. Ils sont destinés à des réseaux de communication interne comme des entreprises, des administrations et ainsi de suite [1].

I.2. L'architecture cellulaire

Wi-Fi est fondé sur une architecture cellulaire. Cette architecture peut s'apparenter à celle utilisée dans la téléphonie mobile où des téléphones mobiles utilisent des stations de base pour communiquer entre eux. Un réseau Wi-Fi est composé d'un ou plusieurs points d'accès, auquel un certain nombre de stations de base équipées de cartes Wi-Fi s'associent pour s'échanger des données. Le rôle du point d'accès consiste à unifier le réseau et à servir de pont entre les stations de ce réseau et un réseau extérieur. La taille de réseau dépend de la zone de couverture du point d'accès, aussi appelé cellule. Cette zone peut varier, car le fait d'utiliser les ondes radio ne permet pas de couvrir constamment une même zone [3].

Un grand nombre de facteurs peuvent varier la taille de zone de couverture du point d'accès, tels les obstacles, les murs ou personnes situés dans l'environnement ou les interférences liées à des équipements sans fil utilisant les mêmes fréquences, ou encore la puissance du signal. Cette unique cellule constitue l'architecture de base de Wi-Fi, appelée BSS, ou ensemble de service de base [1]. Il existe deux types de mode de fonctionnement d'un réseau Wi-Fi :

I.2.1. Mode infrastructure

En mode infrastructure, chaque ordinateur station (notée STA) se connecte à un point d'accès via une liaison sans fil. L'ensemble formé par le point d'accès et les stations situés dans sa zone de couverture est appelé ensemble de services de base (BSS) et constitue une cellule. Chaque BSS est identifié par un BSSID (Basic Service Set Identifier), un identifiant de 6 octets (48 bits). Dans le mode infrastructure, le BSSID correspond à l'adresse MAC du point d'accès. La *Figure I-1* présente ce type d'architecture.

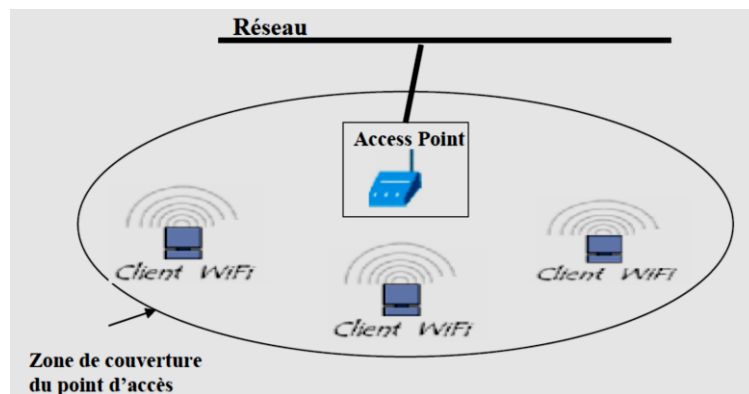


Figure I-1: Fonctionnement d'un BSS [1].

Il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux (ou plus exactement plusieurs BSS) par une liaison appelée système de distribution (notée DS pour Distribution System). Le but est de constituer un ensemble de services étendu (Extended Service Set ou ESS). Le système de distribution (DS) peut être aussi bien un réseau filaire : un câble entre deux points d'accès ou bien même un réseau sans fil comme le montre la *Figure I-2*.

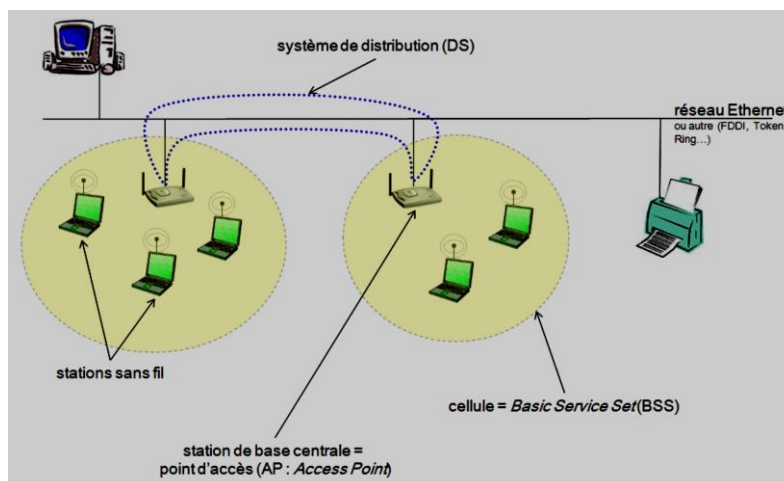


Figure I-2 : Réseau Wi-Fi en mode infrastructure [2].

Lorsqu'un utilisateur nomade passe d'un BSS à un autre lors de son déplacement au sein de l'ESS, l'adaptateur réseau sans fil de sa machine est capable de changer de point d'accès selon la qualité de réception des signaux provenant des différents points d'accès.

Les points d'accès communiquent entre eux grâce au système de distribution afin d'échanger des informations sur les stations et permettre dans le cas échéant de transmettre les données des stations mobiles. Cette caractéristique permettant aux stations de "passer de façon transparente" d'un point d'accès à un autre est appelé itinérance (en anglais roaming) [1].

Les cellules d'un réseau ESS peuvent être disjointes ou recouvertes. Le recouvrement permet d'avoir un réseau plus dense que dans le cas de cellules disjointes ceci offre à l'utilisateur une possibilité de mobilité sans perte de connexion. Le recouvrement permet aussi de connecter un grand nombre d'utilisateurs puisqu'il permet d'augmenter l'étendue du réseau [1].

I.2.2. Mode Ad-hoc

En mode Ad-hoc, les machines sans fil clientes se connectent les unes aux autres afin de constituer un réseau point à point, c'est à dire un réseau dans lequel chaque machine joue en même temps de rôle de client et le rôle de point d'accès comme illustré dans la *Figure I-3*.

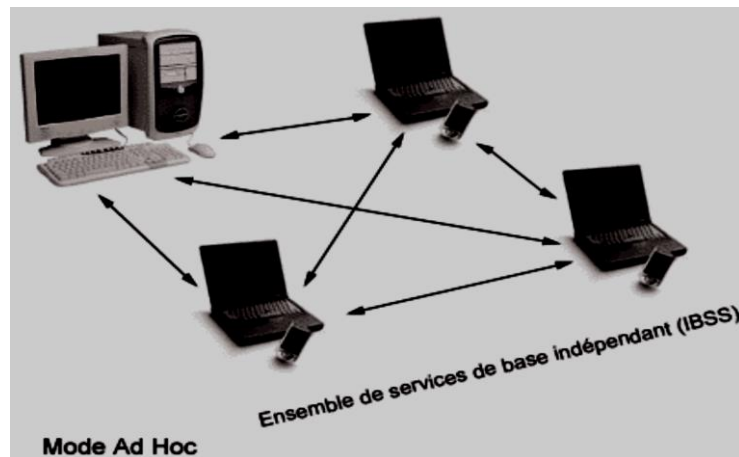


Figure I-3 : Réseau Wi-Fi en mode Ad-hoc [1].

L'ensemble formé par les différentes stations est appelé ensemble de services de base indépendants (en anglais Independent Basic Service Set, abrégé en IBSS). Un IBSS est ainsi un réseau sans fil constitué au minimum de deux stations et n'utilisant pas de point d'accès. L'IBSS constitue donc un réseau éphémère permettant à des personnes situées dans une même salle d'échanger des données. Il est identifié par un SSID (Service Set Identifier), comme l'est un ESS en mode infrastructure. La *Figure I-4* schématise un exemple d'un IBSS.

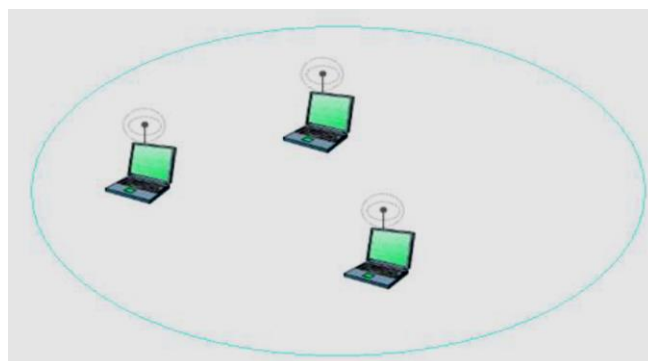


Figure I-4 : Exemple d'un BSS [4].

Dans un réseau Ad-hoc, la portée du BSS est déterminée par la portée de chaque station. Cela signifie que si deux des stations du réseau sont hors de portée l'une de l'autre, elles ne pourront pas communiquer, même si elles "voient" d'autres stations. En effet, contrairement au mode infrastructure, le mode Ad hoc ne propose pas de système de distribution capable de transmettre les trames d'une station à une autre. Ainsi un IBSS est par définition un réseau sans fil restreint [1].

I.3. Les principales normes du Wifi

Lorsque la norme 802.11 est apparue, elle a continué d'évoluer pour répondre à certains besoins tels que la portée, le débit, et en particulier le critère de sûreté le plus important. Le *Tableau I-1* récapitule les différentes catégories de cette norme qui a démarré avec un débit de 1 Mbps et arrive maintenant à 54 Mbps (cinq fois supérieure à la vitesse offerte par le réseau câblé Ethernet le plus utilisé et près de la moitié de la vitesse offerte par Fast Ethernet).

Tableau I-1 : Récapitulatif des normes 802.11 [6].

Nom de la norme	Nom	Description
802.11a	Wi-Fi5	Le standard 802.11a (appelé Wi-Fi5) fournit un débit élevé (54 Mbps théorique, 30 Mbps réel). La norme 802.11a spécifie 8 canaux radio dans la bande de fréquences des 5 GHz.
802.11b	Wi-Fi	Le standard 802.11b est la norme la plus répandue actuellement. Il offre un débit théorique de 11 Mbit/s (6 Mbps réel) avec une portée maximale de 300 mètres dans un environnement clair. La plage de fréquences utilisée est la bande de 2.4 GHz, avec 3 canaux radio disponibles.
802.11c	Pontage 802.11 vers 802.1d	Le standard 802.11c est sans intérêt pour le public en général. Il ne s'agit que d'une modification de 802.1d afin de rapprocher les trames 802.11 (niveau de liaison de données).
802.11d	Internationalisation	Le standard 802.11d est un complément à 802.11 pour permettre l'utilisation internationale de réseaux locaux 802.11. Elle consiste à permettre l'échange d'informations entre les différents équipements sur les gammes de fréquences et les puissances autorisées dans le pays d'origine de l'équipement.
802.11e	Amélioration de la qualité de service	Le standard 802.11e a pour but de fournir des opportunités de service de qualité au niveau de la couche liaison de données. Le but de cette norme est de définir les exigences relatives à la bande passante de différents paquets, et le temps de transmission de façon à permettre, en particulier, une meilleure transmission vocale et vidéo.
802.11f	Itinérance (roaming)	Le standard 802.11f est une recommandation à l'intention des fournisseurs de points d'accès en vue d'améliorer l'interopérabilité des produits. Il offre le protocole « Inter-Access point roaming protocol » permettant à un utilisateur itinérant de changer de point d'accès en toute transparence pendant un déplacement, peu importe les marques des points d'accès présents dans l'infrastructure du réseau. Cette possibilité est appelée itinérance (ou roaming en anglais).
802.11g	Itinérance (roaming)	La norme 802.11g fournira du haut débit (54 Mbps en théorie, 30 Mbps en réel) dans la bande de fréquences de 2,4 GHz. La présente norme n'a pas encore été validée, car le matériel disponible avant de finaliser la norme peut devenir obsolète si elle est modifiée ou amendée. Le standard 802.11g est rétrocompatible avec le standard 802.11b, ce qui signifie que le matériel compatible 802.11g peut fonctionner dans le 802.11b.

802.11h		La norme 802.11h vise à rapprocher la norme 802.11 du standard Européen (HiperLAN 2, d'où le h de 802.11h) et être en conformité avec la réglementation européenne en matière de fréquence et d'économie d'énergie.
802.11i		La norme 802.11i a pour but d'améliorer la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification). Cette norme s'appuie sur l'AES (Advanced Encryption Standard) et propose un chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g.
802.11IR		La norme 802.11IR a été élaborée de telle manière à utiliser des signaux infrarouges. Cette norme est désormais dépassée techniquement.
802.11j		La norme 802.11j est à la réglementation japonaise ce que le 802.11h est à la réglementation européenne.
802.11ac		La norme 802.11ac est arrivée en deux vagues successives et a encore amélioré les débits avec une largeur de bande jusqu'à 160MHz sur la seconde vague. La norme 802.11ac introduit aussi un nouveau procédé avec le Beamforming qui est une technologie qui permet d'orienter le signal vers les appareils connectés assurant ainsi une meilleure connexion, une meilleure portée tout en ne gaspillant pas autant d'énergie (auparavant le signal Wi-Fi émettait à pleine puissance dans toutes les directions).
802.11n		L'amendement IEEE 802.11n fonctionne sur les deux bandes de fréquences 2,4 GHz ISM et 5 GHz U-NII tout en maintenant une rétrocompatibilité avec les normes 802.11b/g et 802.11a. La norme passe de l'utilisation d'une seule antenne pour la transmission et une pour la réception (Single Input Single Output – SISO) à plusieurs antennes (Multiple Input Multiple Output – MIMO) avec plusieurs radios. Certains système SISO supportent une technologie appelée « diversity » qui utilise deux antennes avec une seule radio. On passe de la diversité spatiale au multiplexage spatial MIMO. Les systèmes SISO étaient soumis au phénomène appelé « Multipath », alors que les systèmes MIMO utilisent les rebonds à leur avantage.
802.11ax		La dernière version de la norme Wi-Fi est la 802.11ax qui correspond au Wi-Fi 6 et qui a été commercialisée fin 2019. Elle est conçue pour les réseaux sans fils locaux et c'est cette norme qui succède au norme Wi-Fi5.

Le **Tableau I-2** présente les caractéristiques de quelques normes Wi-Fi

Tableau I-2 : caractéristiques de quelques normes Wi-Fi [6].

Date	Standard	Bande	Largeur	Modulation principale	Antennes	Débit maximum
1997	802.11	2,4 GHz	20 MHz	FHSS		
DSSS (Barker code)	N/A	2 Mbits/s				
1999	802.11b	2,4 GHz	20 MHz	HR/DSSS (CCK)	N/A	11 Mbits/s
1999	802.11a	5 GHz	20 MHz	OFDM	N/A	54 Mbits/s
2003	802.11g	2,4 GHz	20 MHz	ERP-OFDM	N/A	54 Mbits/s
2009	802.11n	2,4 et 5 GHz	20 et 40 MHz	HT-OFDM	MIMO ≤ 4 spatial streams	600 Mbits/s
2013	802.11ac	5 GHz	20, 40, 80 et 160 MHz	VHT-OFDM	MIMO, MU-MIMO ≤ 8 spatial streams	6,93 Gbits/s
fin 2019	802.11ax	2,4Ghz ou 5Ghz	20, 40, 80, 160MHz			2,4Gbps

I.3.1. Bandes de fréquence

Les bandes utilisées dans les réseaux sans fil et notamment dans l'IEEE 802.11 sont dites sans licence. Ainsi, et contrairement aux réseaux mobiles tels que l'UMTS, leur utilisation est libre et aucune rémunération n'est demandé aux utilisateurs.

- ❖ La bande 2,4GHz est la bande utilisée pour les amendements IEEE 802.11b et IEEE 802.11g.
- ❖ La bande 5 GHz est quant à elle réservée à l'amendement IEEE 802.11a [2].

I.3.2. Supports de transmission du Wi-Fi

I.3.2.1. Infrarouge

- ❖ Signal facilement bloqué, nécessite un espace dégagé, de faible portée, débit de seulement 4 Mbps,
- ❖ Adapté aux transmissions de données entre ordinateurs et imprimantes.

I.3.2.2. Fréquences radio

- ❖ Passe à travers la plupart des obstacles dans un bureau,
- ❖ Bande des 2.4GHz organisées en 14 canaux de 22MHz de largeur de canal [2].

I.4. Principe générale de transmission de données sur Wifi

Dans la norme Wi-Fi, le passage d'une cellule à une autre sans interruption de la communication n'a pas été prévu dans les premières versions, et le handover a dû être introduit dans les nouvelles versions. De même, la sécurité a été renforcée pour éviter qu'un client ne prenne la place d'un autre ou qu'il n'écoute les communications d'autres utilisateurs.

Wi-Fi utilise un système a saut de fréquence (fréquence hopping), dans lequel le support s'interrompt toutes les 20 ms pour changer de fréquence. Le support n'est libéré qu'une fois tous les fragments transmis avec succès ou que la station source ne réussit pas à recevoir l'acquittement d'un fragment transmis [5].

La station destination acquitte chaque fragment reçu avec succès en envoyant un ACK à la station source. Cette dernière garde le contrôle du support pendant toute la durée ACK ou après la transmission d'un fragment. Si un ACK n'est pas correctement reçu, la station source arrête la transmission et essaie d'accéder de nouveau au support. Une fois la station source a accédé au support, elle commence à transmettre à partir du dernier fragment non acquitté [5].

I.5. Les protocoles du réseau Wifi

Comme tous les standards de l'IEEE, l'IEEE 802.11 couvre les deux premières couches du modèle de référence OSI (Open System Interconnexion).

I.5.1. La couche physique

La couche physique a pour rôle de transporter correctement la suite de signaux 0 ou 1 que l'émetteur souhaite envoyer au récepteur. Cette couche physique est divisé en deux sous-couches :

-PLCP (Physical Layer Convergence Protocol),

-PMD (Physical Medium Dependent).

La sous-couche PMD gère la modulation et s'occupe de l'encodage des données. De son côté, la sous-couche PLCP s'occupe de l'écoute du support que fournit un CCA (Clear Channel Assessment), qui est le signal utilisé par la couche MAC pour savoir si le support est occupé ou non. L'IEEE 802.11 définit quatre couches physiques différentes : [\[5\]](#)

I.5.1.1. Le FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) ou Etalement de spectre par saut de fréquence

Le FHSS utilise la bande des 2,4GHz de l'ISM (Industrial, Scientific and Medical), cette technique utilise 79 canaux, chacun avec une largeur de bande de 1 MHz, en commençant à la base du spectre des 2.4 GHz. Un générateur de nombres pseudo-aléatoires permet de produire la séquence des fréquences qu'une transmission doit suivre. Tant que deux stations alimentent le générateur de nombres aléatoires avec la même valeur de départ (seed) et restent synchronisées dans le temps, elles adoptent les mêmes fréquences en même temps. Le temps de maintien (dwell time) de chaque fréquence est donné par un paramètre qui peut être ajusté, mais doit être inférieur à 400 ms [\[5\]](#).

I.5.1.2. Le DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Le DSSS utilise la bande des 2,4 GHz de l'ISM (*Figure I-5*). Il offre aussi des débits limités à 1 et 2 Mbit/s. Cette technique présente certaines similitudes mais aussi certaines différences, avec le système CDMA. Chaque bit est représenté lors de la transmission par 11 chips, en utilisant la séquence de Barker. Elle s'appuie sur un décalage de phase à une vitesse de 1 Mbaud et transmet 1 bit par baud pour le débit de 1 Mbit/s, et 2 bits par baud pour celui de 2 Mbit/s [\[4\]](#).

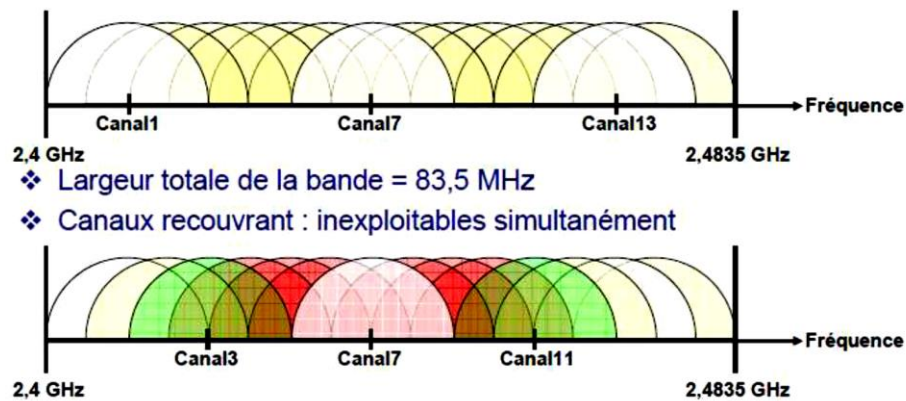


Figure I-5: Fonctionnement d'un DSSS [4].

I.5.1.3. IR(Infrarouge)

L'infrarouge n'est utilisé que dans les cas où les distances entre les différentes stations sont faibles.

I.5.1.4. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

La quatrième couche physique a ensuite été définie dans la bande des 5.2 GHz (**Figure I-6**). Grâce au codage OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), des débits compris entre 6 et 54 Mbit/s sont atteints. 802.11a est le premier standard à utiliser un codage OFDM pour une communication de type paquet. Cette technologie était jusqu'à présent utilisée pour des systèmes de transmission de données continus, tels que DVB (Digitale Video Broadcasting) ou DAB (Digitale Audio Broadcasting).

Pour qu'un signal soit reçu correctement, sa portée ne peut dépasser 150 m dans un environnement de bureau, 600m sans obstacle et 1,5 Km avec une antenne extérieure.

En règle générale, Les stations ont une portée maximale de 50m. Lorsqu'il y a traversée de murs. Cette distance est souvent plus restrictive [4].

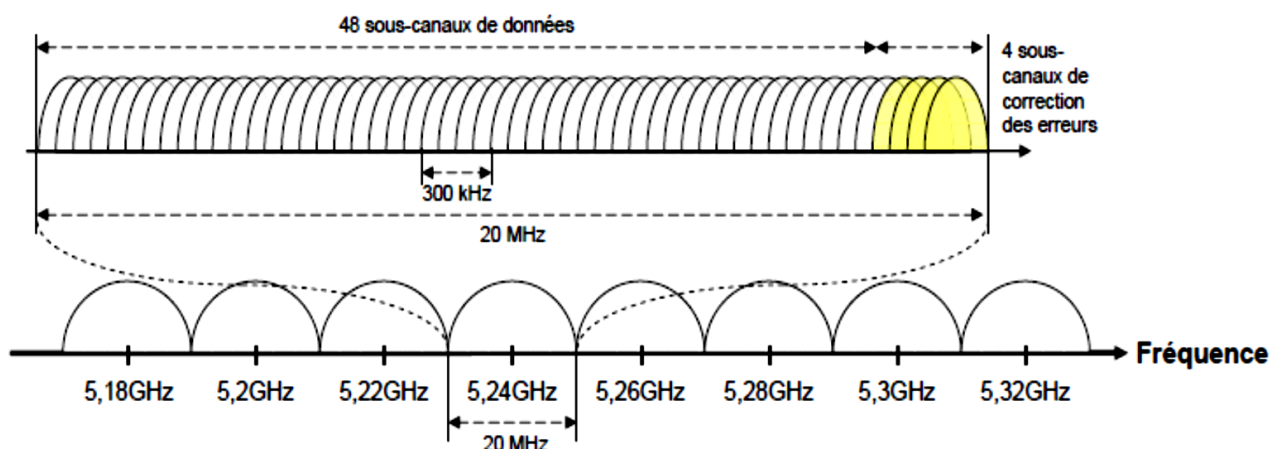


Figure I-6: Fonctionnement d'un OFDM [2].

De plus, on distingue aussi une technique récemment introduite qui est HR-DSSS ou étalement de spectre à haut débit par séquence directe. Cette technique est récente et est une technique de modulation par étalement de spectre. Elle utilise 11 millions de chips par seconde pour offrir un débit de 11 Mbit/s dans la bande de 2.4 GHz. Elle porte la désignation de 802.11b, bien qu'elle ne succède pas à la norme 802.11a. En fait, sa norme a été approuvée et introduite sur le marché avant celle-ci. Les débits de données offerts par 802.11b sont 1, 2, 5.5 et 11 Mbits. Les deux débits les plus faibles sont atteints avec une vitesse de 1 M baud, avec respectivement 1 et 2 bits par baud, en utilisant la modulation par décalage de phase (pour des raisons de compatibilité avec DSSS). Les deux autres sont atteints avec une vitesse de 1.375 M baud, avec respectivement 4 et 8 bits par baud au moyen des codes Walsh/Hadamard [4].

I.5.2. La couche liaison de données

La couche liaisons des données du protocole 802.11 est composée essentiellement de deux sous-couches LLC (Logical Link Control) et MAC. La couche LLC permet de relier un WLAN à tout autre réseau local appartenant à un standard de l'IEEE. La couche MAC, quant à elle, est spécifique de l'IEEE 802.11.

Le rôle de la couche MAC 802.11 est assez similaire à celui de la couche MAC 802.3 du réseau Ethernet terrestre, puisque les terminaux écoutent la porteuse avant d'émettre. Si la porteuse est libre, les terminaux émettent, sinon il se met en attente. Cependant la couche MAC 802.11 intègre un grand nombre de fonctionnalités que l'on ne trouve pas dans la version Terrestre. Les fonctionnalités nécessaires pour réaliser un accès sur une interface radio sont les suivants [3]:

- Procédures d'allocation du support ;
- Adressage des paquets ;
- Formatage des trames ;
- Contrôle d'erreur CRC (Cyclic Redundant Check) ;
- Fragmentation-Réassemblage.

L'une des particularités du standard est qu'il définit deux méthodes d'accès fondamentalement différentes au niveau de la couche MAC. La première est le DCF (Distributed Coordination Function). Le DCF a été conçu pour prendre en charge le transport de données asynchrones, dans lequel tous les utilisateurs qui veulent transmettre des données ont une chance égale d'accéder au support [7].

La seconde méthode d'accès est le PCF (Point Coordination Function). Fondée sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux, ou polling, contrôlée par le point d'accès, la méthode PCF est conçue essentiellement pour la transmission de données sensibles, qui demande une gestion du délai utilisé pour les applications temps réel, telles que la voix ou la vidéo. Un réseau

de type ad-hoc utilise uniquement le DCF, tandis qu'un réseau classique Wi-Fi, avec des points d'accès, utilise à la fois le DCF et le PCF comme méthodes d'accès [3].

I.6. Les Techniques d'accès

I.6.1. Le protocole CSMA/CD

Dans un réseau local Ethernet classique, la méthode d'accès utilisée par les machines est le CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), permet de détecter les collisions et traite les collisions qui se produisent lorsque plusieurs stations accèdent au support, pour lequel chaque machine est libre de communiquer à n'importe quel moment.

Dans ce même contexte, le CSMA/CD a été légèrement modifié pour aboutir au CSMA/CA (Carrier Sens Multiple Access/Collision Avoidance), qui a pour but de prévenir au maximum les collisions [4].

I.6.2. Le protocole CSMA/CA

Le CSMA/CA évite les collisions en utilisant des trames d'acquiescement, ou ACK (Acknowledgement). Un ACK est envoyé par la station destination pour confirmer que les données sont reçues de manière intacte. L'accès au support est contrôlé par l'utilisation d'espaces inter-trames, ou IFS (Inter-Frame Spacing), qui correspond à l'intervalle de temps entre la transmission des deux trames. Le standard définit trois types d'IFS [4] :

- SIFS (Short Inter-Frame Spacing), le plus petit des IFS de valeur $28 \mu\text{s}$, est utilisé pour séparer les transmissions au sein d'un même dialogue.
- PIFS (PCF IFS), utilisé par le point d'accès pour accéder avec priorité au support. Le PIFS correspond à la valeur du SIFS, auquel on ajoute un timeslot défini dans l'algorithme de Back-off, de $78 \mu\text{s}$.
- DIFS (DCF IFS), utilisé lorsqu'une station veut commencer une nouvelle transmission. Le DIFS correspond à la valeur du PIFS, à laquelle on ajoute un temps de $128 \mu\text{s}$.

Les terminaux d'un même BSS peuvent écouter l'activité de toutes les stations qui s'y trouvent. Lorsqu'une station envoie une trame, les autres stations l'entendent et, pour éviter une collision, mettent à jour un timer, appelé NAV (Network Allocation Vector). Les autres stations n'ont pas la capacité de transmettre qu'après la fin du NAV [4].

Lors d'un dialogue entre deux stations, le NAV détermine l'instant auquel la trame peut-être transmise avec succès. Une station source voulant transmettre des données écoute le support. Si aucune activité n'est détectée pendant une période de temps correspondant à un DIFS, elle transmet ses données immédiatement. Si le support est encore occupé, elle continue de l'écouter jusqu'à ce qu'il soit libre [7].

Si les données envoyées sont reçues intactes, la station destination attend pendant un temps équivalent à un SIFS et émet un ACK pour confirmer leur bonne réception. Lorsque la station source transmet ses données, les autres stations mettent à jour leur NAV. La **Figure I-7** illustre le processus de transmission des trames à partir d'un émetteur [4].

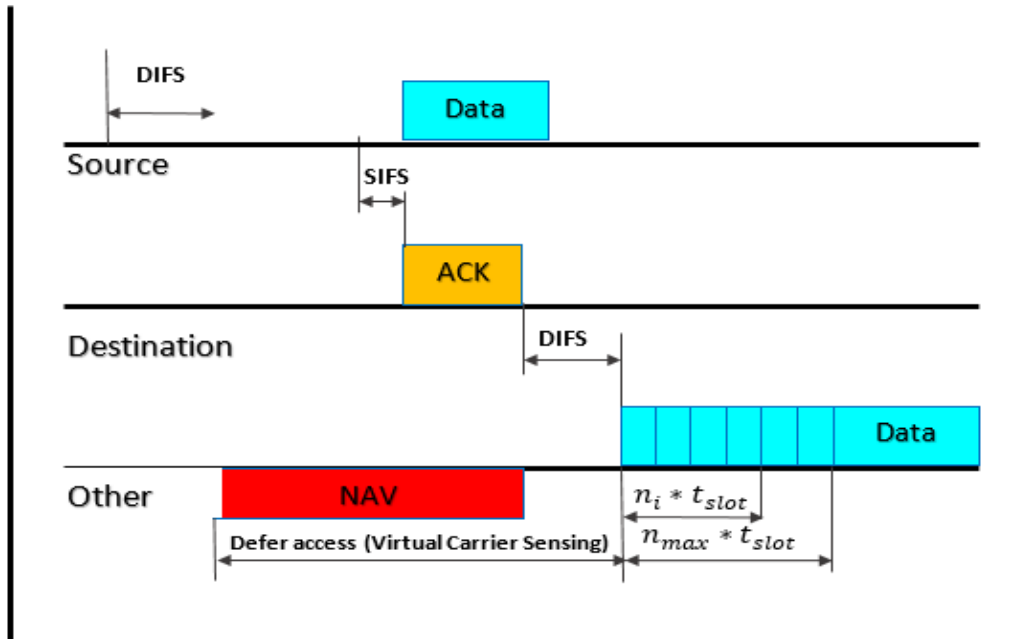


Figure I-7: Processus de transmission des trames [5].

I.6.3. La réservation RTS/CTS et le problème de la station cachée

Dans réseau Wi-Fi, l'écoute du support se fait à la fois au niveau de la couche physique, avec le PCS (Physical Carrier Sense), et au niveau de la couche MAC avec, le VCS (Virtual Carrier Sense). Le PCS détecte la présence d'autre station Wi-Fi en analysant toutes les trames passant sur le support hertzien et en détectant l'activité sur le support grâce à la puissance relative des autres stations [5].

Le VCS est mécanisme de réservation fondé sur l'envoi des trames RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) entre une station source et une station destination avant tout envoi de données. Une station source qui veut transmettre envoie un RTS. Toutes les stations de BSS entendant le RTS lisent le champ de durée de RTS et mettent à jour leurs NAV. La station de destination ayant reçu le RTS répond, après avoir attendu pendant un SIFS, en envoyant un CTS. Les autres stations entendant le CTS lisent le champ de durée du CTS et mettent à jour à nouveau leurs NAV. Après réception du CTS par la station source cette dernière est assurée que le support soit stable et réservé pour sa transmission de données. **La Figure I-8** décrit le processus d'émission d'une trame lorsque la station de destination est cachée [7].

Chapitre II : Dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux

II.1. Introduction

Les signaux Wi-Fi peuvent être dégradés dans des canaux non-idéaux en raison de plusieurs facteurs, notamment la distance entre le routeur et l'appareil, les interférences d'autres signaux Wi-Fi ou de périphériques électroniques, et les obstacles physiques tels que les murs ou les meubles.

Lorsque le signal Wi-Fi est transmis, il utilise une certaine fréquence pour transporter les données. Si plusieurs réseaux utilisent les mêmes canaux, ils peuvent causer des interférences, ce qui peut ralentir la vitesse de connexion et réduire la portée du signal. De plus, si le routeur et l'appareil se trouvent à une grande distance l'un de l'autre, le signal Wi-Fi peut être affaibli, ce qui peut entraîner une connexion instable et une vitesse de connexion réduite. Ce phénomène de réduction de débit est bien expliqué par le théorème de Shannon de capacité de canal $C=B \log_2(1+P_{\text{signal}}/P_{\text{bruit}})$. Ici, B désigne la bande passante en Hz, P_{signal} est la puissance du signal reçu et P_{bruit} est la puissance moyenne du bruit. Nous constatons que si le récepteur s'éloigne davantage de l'émetteur (le point d'accès), le rapport $P_{\text{signal}}/P_{\text{bruit}}$ tend vers zéro et donc la capacité C, qui n'est rien que le débit maximal supporté par le canal pour garantir des transmissions sans erreurs, tend vers 0 bit/sec. Les obstacles physiques, tels que les murs et les meubles, peuvent également réduire la force du signal Wi-Fi ce qui induit automatiquement une diminution du débit.

Pour améliorer la qualité du signal Wi-Fi dans des canaux non idéaux, on peut essayer de déplacer le routeur vers un endroit plus central, éloigné des obstacles physiques. On peut également envisager d'utiliser des répéteurs Wi-Fi pour étendre la portée du signal. Enfin, nous pouvons également envisager de changer de canal Wi-Fi pour éviter les interférences avec d'autres réseaux.

II.2. Atténuation des signaux radiofréquences (RF)

II.2.1. Définition

L'atténuation ou perte est décrite par la diminution de l'amplitude ou force du signal. Un signal peut perdre de la force quand il est transmis sur un câble ou dans l'air. Sur le câble, le signal électrique AC perd de la puissance à cause de l'impédance électrique du câble coaxial et des composants comme les connecteurs. Avant, l'atténuation n'était pas voulue, mais avec la densification des réseaux, les designs des réseaux sans fil ont évolué de la planification de la couverture à la planification de la capacité.

Une fois que le signal RF est propagé dans l'air via l'antenne, le signal s'atténue du fait de l'absorption, de la distance et peut être de l'effet négatif de trajets multiples connue sous le terme « Multipath ». Lorsqu'un signal traverse différents matériaux, le signal peut être absorbé ce qui produit une perte d'amplitude. Différents matériaux engendrent différents résultats d'atténuation.

Comme l'indique le *Tableau II-1* suivant, un signal RF 2,4 GHz qui traverse une cloison sèche, s'atténue de 3 dB et perd la moitié de son amplitude d'origine. Le même signal qui traverse un mur de brique s'atténue de 12 dB, ce qui engendre un signal avec une amplitude 16 fois moins importante que celle d'origine. L'eau est une source majeure d'absorption, comme les matériaux denses tels que les parpaings [8].

Tableau II-1 : Evolution de l'atténuation des matériaux dans la gamme 2,4 GHz [8].

Matériaux	Atténuation en 2,4GHz
Fondation Wall ou mur de fondation	-15dB
Brik , concret , concret blocks ou brique , béton , blocs de béton	-12 dB
Elevator or métal obstacle ou ascenseur ou obstacle en métal	-10 dB
Métal rack ou Armoire métallique	-6 dB
Dry Wall or sheetrock ou cloison sèche ou doublage Placoplatre	-3 dB
Nontinted glass Windows ou fenêtres en verre non teinté	-3 dB
Wood door ou Porte en bois	-3 dB
Cubicle Wall ou mur cellulaire	-2 dB

II.2.2. Formules physiques de l'atténuation

II.2.2.1. Atténuation d'espace ("path loss"):

La diffusion se produit quand le signal RF s'élargit naturellement à la sortie de l'antenne, ce qui engendre une diminution d'amplitude et une baisse de puissance au fur et à mesure de l'éloignement de l'antenne indépendamment de l'atténuation causée par les obstacles, l'absorption, la réflexion, la diffraction, etc.... Ce comportement est connu sous le nom de « Free Space Path Loss » (FSPL), parfois appelé « Beam Divergence », ce qui est le facteur de perte le plus important dans une liaison RF. FSPL se calcule à l'aide de la formule de Friis. L'antenne réceptrice est seulement capable de recevoir une petite quantité du signal transmis du fait de la propagation dans l'air. Tout signal qui n'est pas reçu par l'équipement est considéré comme perdu. La perte de puissance n'est pas linéaire mais logarithmique. Un signal 2,4 GHz perd 80 dB après 100 mètres, mais ne perd que 6 dB les 100 mètres suivants. Pour évaluer l'affaiblissement en espace libre en fonction de la longueur d'onde, on utilise la formule suivante, déduite de la formule de Friis, qui est plus générale [8].

$$A = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \quad (\text{II.2})$$

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} d \quad (\text{II.3})$$

Avec :

A est l'affaiblissement en espace libre en dB et d la distance entre l'émetteur et le récepteur en mètres tandis que λ est la longueur d'onde du signal en mètres.

II.2.3. Propagation en espace libre

Généralement, l'environnement de propagation a une influence sur l'onde électromagnétique émise. En espace libre, le système de transmission est caractérisé par l'absence d'obstacles. La densité de puissance W dans un espace libre s'exprime en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur d , le gain de l'antenne d'émission G_e et la puissance du signal émis P_e [12].

$$W = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2} \quad (\text{II.4})$$

La puissance du signal disponible aux bornes d'une antenne de réception P_r est reliée à la densité de puissance W par la relation suivante :

$$P_r = W \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (\text{II.5})$$

où G_r représente le gain de l'antenne de réception et λ représente la longueur d'onde à la fréquence de travail.

On peut calculer l'atténuation du signal en espace libre en utilisant les deux formules précédentes comme suit [12]:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_e \left(\frac{c}{4f\pi d} \right)^2 \quad (\text{II.6})$$

où c , la vitesse de la lumière s'exprime comme $c = f\lambda$.

Il convient de noter que la formule ci-dessus n'est pas valable que lorsque l'antenne de réception est considérée dans le champ lointain de l'antenne d'émission. Cette condition est vérifiée lorsque la distance d entre les antennes est supérieure à la distance de Fraunhofer d_f qui est reliée à la plus large dimension D de l'antenne d'émission [13]:

$$d_f = 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (\text{II.7})$$

L'affaiblissement en espace libre en décibels est donné par la relation suivante [12] :

$$P_L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log_{10} \left[G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right] \quad (\text{II.8})$$

II.3. Canal de propagation

II.3.1. Définition du canal de propagation

Par définition, un canal de propagation est le support de transmission des systèmes de communication sans fil. Il caractérise la propagation électromagnétique en tenant compte de ses interactions et de l'environnement de propagation. C'est pourquoi, il est essentiel de connaître avec précision tous les mécanismes et caractéristiques du canal pour modéliser les performances du système. Cependant, il est important de faire la distinction entre le canal de propagation et le canal de transmission illustrés sur la *Figure II-1* [13].

Le canal de transmission est le quadripôle dont les accès sont les connecteurs des antennes Tx et Rx et inclut le diagramme de rayonnement des antennes utilisées. La fonction de transfert est très simple à obtenir en utilisant un analyseur de réseau vectoriel par exemple. Le canal de propagation est un concept plus abstrait car il est non mesurable directement. Il ne tient compte que des interactions du signal avec l'environnement, contrairement au canal de transmission qui inclut en plus les effets induits par les antennes [12].

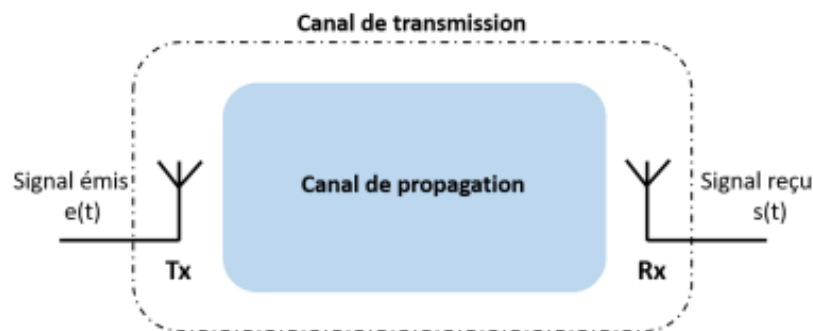


Figure II-1 : Effets et conséquences possibles de la dynamique du canal [14].

II.3.2. Modèles de l'atténuation

II.3.2.1. Modèle d'atténuation à l'air libre

Ce modèle est idéal car il est sans obstacles et ni une ligne de mire ("Line Of Sight"). Il y a aussi le modèle de loi de puissance en fonction du gain d'antenne d'émission et de réception [12].

$$L_{dB} = 20 \log_{10} d + 10 \log_{10}(4\pi^2 L_s) - 10 \log_{10}(G_R G_E \lambda^2) \quad (\text{II.9})$$

Exposant $n=2$: atténuation « relativement » faible

II.3.2.2. Modèle de propagation extérieure

Ce modèle est constitué d'un signal direct et d'un signal réfléchi (*Figure II-2*). Il est approprié si la surface entre l'émetteur et le récepteur est plane

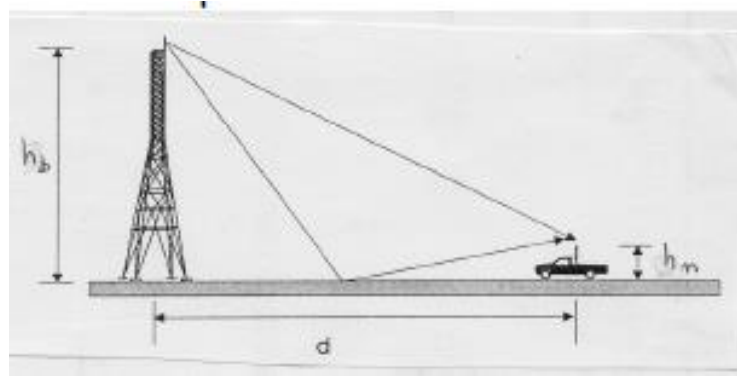


Figure II-2 : Modèle de propagation Extérieur [10].

$$L_{dB} = 20\log d + 10 \log(4p^2) - 10 \log(G_R G_E \lambda^2) - 20 \log \sin\left(\frac{2p h_b h_m}{\lambda d}\right) \quad (II.10)$$

$$L_{dB} = 40\log d - 10\log(G_R G_E h_b^2 h_m^2) \text{ pour } \lambda d \gg h_b h_m \quad (II.11)$$

II.3.2.3. Modèle de diffraction par les toits

La forme de l'obstacle est supposée avoir peu d'effet sur la diffraction l'obstacle mobile 1 a une faible diffraction. Le dernier obstacle diffractant vers l'objet mobile avec des coefficients connus.

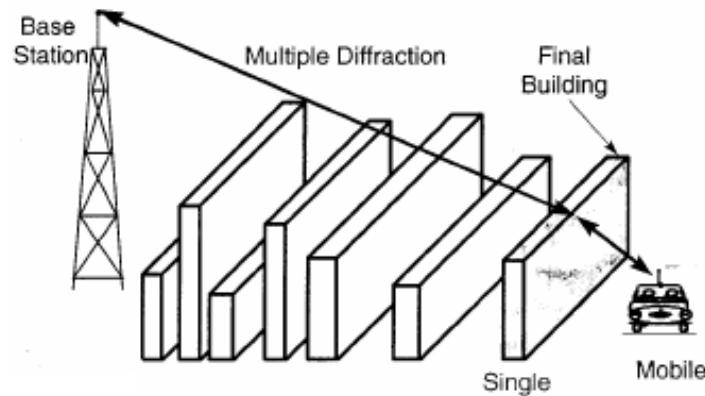


Figure II-3 :Modèle de diffraction par les toits [10].

II.3.2.4. Modèle de diffraction par toits plats

Ce modèle est plus simplifié car les bâtiments ont la même taille et même séparation

$$L_e \propto \left(\frac{h_B h_0}{d} \sqrt{\frac{p w}{\lambda}}\right)^{-0.99 \log M} \quad (II.12)$$

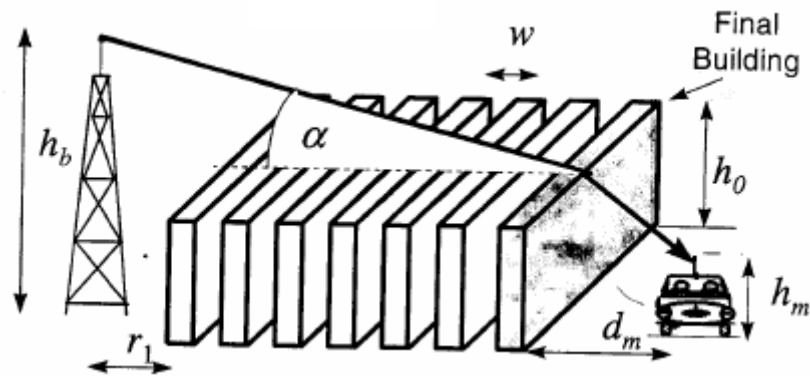


Figure II-4 : Modèle de diffraction par toits plats [11].

II.3.3. Différents obstacles des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux

Les signaux Wi-Fi sont des ondes radio dont la propagation est altérée par différents obstacles: Murs, meubles, vitres, êtres vivants, etc. Le paradoxe est comment assurer une portée plus importante afin de fournir plus de mobilité et en même temps limiter la réception Wi-Fi à un périmètre bien précis pour que des utilisateurs voisins n'y aient pas accès ?

En théorie, la portée d'un signal Wi-Fi est d'environ 100 mètres (norme 802.11g). Dans la pratique, cette distance n'est atteignable qu'au beau milieu d'un pré, car le Wi-Fi est sensible aux différents obstacles qui se dressent sur son passage : cloisons, murs, vitres, meubles, etc. Même les êtres vivants (êtres humains, animaux, végétaux) constituent des éléments atténuateurs de l'onde Wi-Fi. Toutefois, tous les obstacles n'ont pas le même effet sur ce type de signaux et ils affaiblissent les ondes de différentes façons: Par réflexion, réfraction, diffraction ou absorption.

II.3.3.1. La réflexion/réfraction

Elle apparaît lorsque l'onde atteint un obstacle dont la longueur est grande et les irrégularités de la surface petites par rapport à la longueur d'onde. Suivant la composition du réflecteur (plus au moins conducteur), l'énergie est soit réfléchi, dans le cas où le réflecteur est parfaitement conducteur, ou soit réfractée. Lors de la réfraction, une partie de l'énergie est transmise à travers l'objet et une partie est réfléchi. Si à la surface d'un objet, des aspérités petites par rapport à la longueur d'onde sont présentes, de multiples réflexions diffuses peuvent avoir lieu dans diverses directions [12].

II.3.3.2. La diffraction

Elle se produit lorsque l'onde rencontre un objet ayant des dimensions petites par rapport à la longueur d'onde et dont les caractéristiques physiques le rendent imperméable aux ondes électriques ou lorsque l'objet a des arêtes vives. Alors chaque lieu de diffraction se comporte comme une source secondaire de rayonnement de l'onde [12].

II.3.3.3. La diffusion

Il intervient lorsque l'onde rentre dans une zone contenant un nombre important d'éléments de dimensions proches de la longueur d'onde où inférieures. La diffusion apparaît aussi lorsque la surface d'un objet à des aspérités suffisamment grandes par rapport à la longueur d'onde et en grand nombre. Grâce à la réflexion/réfraction, la diffraction et la diffusion, une onde peut atteindre des zones d'ombres qu'elle n'aurait pas pu atteindre autrement. C'est pourquoi même en visibilité non directe (Non Line of Sight NLOS) un récepteur peut capter des signaux électromagnétiques. La capacité des ondes Wi-Fi à traverser une variété de matériaux est reportée sur la **Figure II-4**.

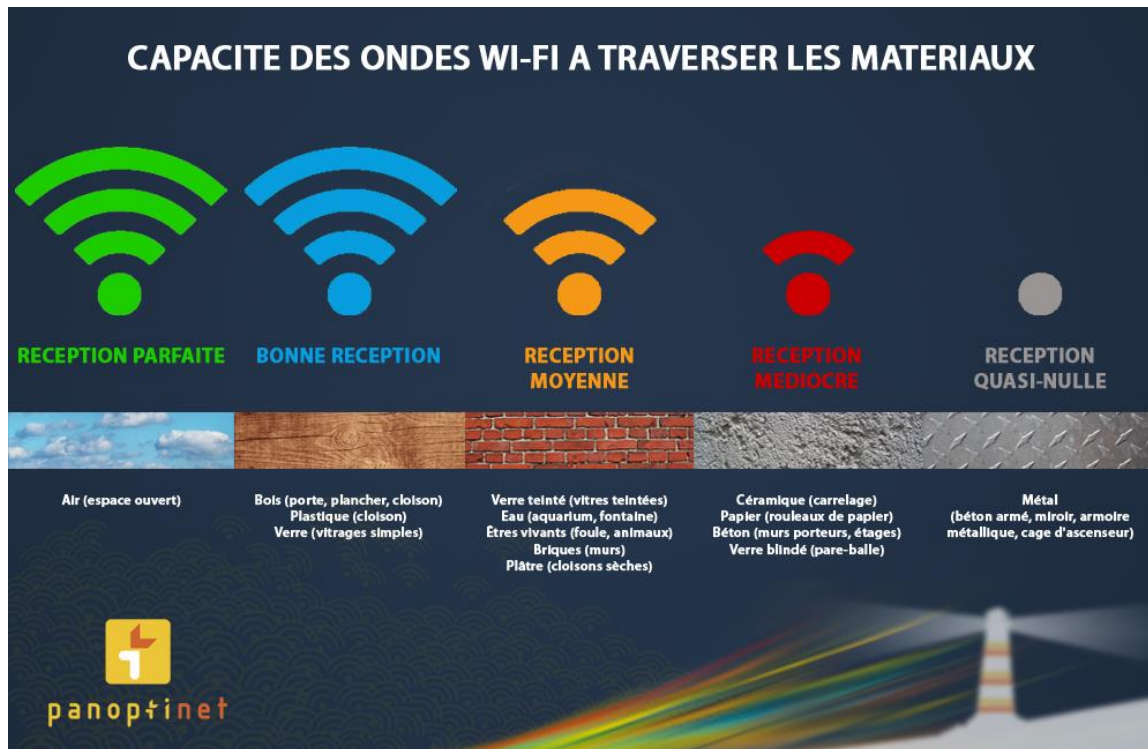


Figure II-5 : La capacité des ondes à traverser les matériaux [14].

Les modèles de l'atténuation des signaux wifi dans les canaux non-idéaux :

Modèle de variation du canal: Du modèle déterministe au modèle aléatoire

- a) Modèle déterministe : pour appréhender les phénomènes, mais non complet/adéquat en radio-mobile (sauf si espace très dégagé)

$$\mathbf{r}_{RF}(t) = \sum_{l=1}^L \mathbf{p}_l * \mathbf{x}_{RF}(t - \tau_l(t)) \quad (\text{II.13})$$

- sur quelques λ : $p_l(t) \approx p_l$
- dérive linéaire du retard (et donc de

Phase au cours du temps t :

$$\tau_l(t) = \Delta_l * t + \tau_l(0) \quad (\text{II.14})$$

$$\text{ou } \Delta_l = \frac{v_m}{c} \cdot \cos(\theta_l) \quad (\text{II.15})$$

$$\phi_l(t) = -2\pi f_0 \tau_l(t) \quad (\text{II.16})$$

v_m : vitesse uniforme du mobile ; $c = 3.10^8$ m/sec

• Cas $L=1$ trajet avec éloignement du mobile $\theta_l=0$ (et convention $\theta_l(0) = 0$) : si retard $\tau_l(t) = (v_m/c) \cdot t$, alors [11].

Sans bruit :

$$r_{RF}(t) = p_l \cdot x_{RF}(t - \tau_l(t)) \quad (\text{II.17})$$

$$\tilde{r}(t) = \tilde{x}(t - \tau_l(t)) \cdot p_l \exp\{-j2\pi f_0 (v_m/c) t\} \quad (\text{II.18})$$

=> Décalage de fréquence Doppler $-f$

A.N. (UMTS): $f_0 = 2$ GHz, $v_m < 500$ km/h => $f_d < 926$ Hz ; $\Delta_l = +4,6.10^{-7}$

$B = 5$ MHz ($1/B = 200$ ns)

Variation des paramètres : modèle déterministe

Durant $T = 1$ msec => déplacement $d < \lambda = 15$ cm => délai τ_l quasi-constant vis-à-vis (résolution temp. $1/B$) : $\delta\tau_l < 0,46$ ns => phase $\phi_l(t)$ à variation linéaire non négligeable [11]:

$$|\delta\phi_l| = 2\pi f_0 \times \sigma_t < 334^\circ \quad (\text{II.19})$$

Conclusion sur quelques λ : variation surtout des amplitudes complexes :

$$\tilde{r}(t) \approx \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) * \tilde{x}(t - \tau_l) \text{ avec } \alpha_l(t) = p_l \cdot \exp(j\phi_l(t)) \quad (\text{II.20})$$

Conclusion modèle déterministe (espace libre, peu de diffuseurs) :

$$\phi_l(t) = -2\pi f_d \cos(\phi_l) * t + cte \quad (\text{II.20})$$

=> gain complexe α_l du trajet traduit une dérive linéaire de phase, c'est à dire décalage de fréquence $-f_d \cos \phi_l$ où fréquence Doppler: $f_d = (v_m/c) \cdot f_0$ [11].

II.4. Effets pratiques des interférences Wi-Fi et non Wi-Fi sur les émetteurs Wi-Fi actifs

(Cette section est une synthèse de plusieurs séquences vidéo de YouTube en anglais en plus du cours de propagation des ondes M1 Systèmes des Télécommunications)

Les interférences Wi-Fi peuvent entraîner des problèmes de connexion, des vitesses plus lentes ou des points morts qui, à leur tour, empêchent les sites Web de se charger et les services de streaming de se mettre en mémoire tampon. Les obstacles quant à eux, provoquent en plus des interférences par trajets multiples, des dégradations inévitables dues à l'atténuation des ondes électromagnétiques lors de leur passage à travers les milieux matériels. Plus le matériau est dense, plus l'impact sur la qualité du signal Wi-Fi est important.

Dans ce contexte, il est important de noter que la nature de matériaux, l'épaisseur et le nombre de murs, de plafonds et d'autres objets que les signaux sans fil doivent traverser peuvent limiter la portée du signal Wi-Fi indoor et par conséquent réduire les débits binaires en réception.

Sachant que l'ennemie principale des ondes EM est les conducteurs, des constatations pratiques à domicile ont mené aux résultats suivants :

- Les murs de brique, de pierre et de béton limiteront l'efficacité d'un signal sans fil provoquant des pertes de 6 à 18 dB soit un taux d'affaiblissement de 29 à 85% tandis que la cloison sèche et la porte en bois résultent en une atténuation de 3 à 4 dB soit un taux de 15 à 20%,
- Les murs et les plafonds intérieurs constituent davantage une obstruction lorsqu'ils contiennent de l'isolant, des conduits métalliques, des tuyaux métalliques et des montants en acier,
- Les gros appareils électroménagers et les meubles lourds peuvent physiquement bloquer les signaux Wi-Fi,
- Le verre des fenêtres, des miroirs, les douches à jet en cours d'utilisation et les aquariums peuvent renvoyer les signaux Wi-Fi dans la pièce de manière imprévisible. En fait, La densité du matériau affectera la quantité de signal Wi-Fi absorbée ou perdue. Les surfaces conductrices, quant à elles, réfléchissent l'onde EM alors qu'une certaine puissance de radiation est absorbée et convertie en énergie thermique à des petites épaisseurs appelées profondeurs de peau (skin depth). A titre d'exemple, le verre cause des pertes de 2 à 3 dB soit un taux d'affaiblissement de 10 à 15% mais ces pertes montent à 13 dB soit un taux d'atténuation de 62% pour le double vitrage,
- La peinture au plomb (peu courante) agit comme un bouclier efficace contre les signaux radio et peut diminuer ou bloquer un réseau Wi-Fi local.

Les interférences corrompent alors ou modifient les signaux Wi-Fi. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories à savoir:

II.4.1. Interférences par des dispositifs Wi-Fi (interférences couche 2)

Ce type d'interférences inclut :

- L'évanouissement par trajets multiples,
- Les interférences dans le même canal ou co-canal ralentissant les transmissions lorsque le nombre de dispositifs Wi-Fi actifs augmente (*Figure II-6*),
- Les interférences des canaux adjacents qui influent plus sur les réseaux Wi-Fi à 2.4 GHz.

II.4.2. Interférences par des dispositifs non Wi-Fi (interférences couche 1)

Ces interférences peuvent être causées par d'autres réseaux sans fil, d'autres appareils à fréquence 2.4 GHz et des appareils à haute tension qui génèrent des interférences électromagnétiques (*Figure II-7*). Parmi les dispositifs commercialisés on cite :

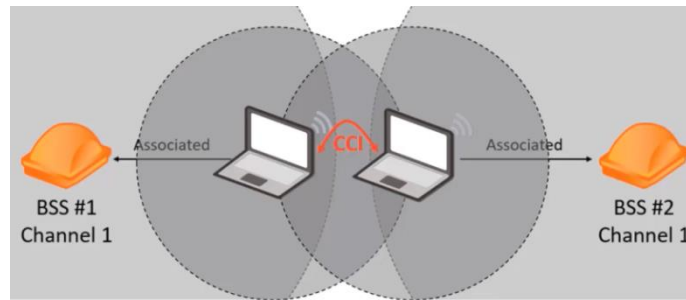


Figure II-6 : Interférences co-canal (co-channel interference CCI) causées par des signaux provenant de points d'accès qui se chevauchent (phénomène plus fréquent pour le 2.4 GHz).

- Les appareils Bluetooth tels que les écouteurs et les haut-parleurs qui fonctionnent à 2.4 GHz. Les nouveaux modèles d'appareils Bluetooth sont généralement conçus pour éviter les canaux Wi-Fi actifs,
- Les téléphones sans fil utilisent souvent 2.4 GHz. Si les performances d'un réseau Wi-Fi diminuent chaque fois qu'un téléphone sans fil est utilisé, on doit passer à des téléphones sur une fréquence différente,
- Les moniteurs pour bébé utilisent eux aussi 2.4 GHz. Étant donné la connexion constante entre le moniteur et le récepteur, un tel dispositif peut affecter les performances du réseau Wi-Fi actif,
- Les micro-ondes, en particulier les plus anciennes ou ceux mal protégées, peuvent provoquer de nombreuses interférences électromagnétiques dans l'espace 2.4 GHz,



Figure II-7 : Exemple de sources d'interférences non Wi-Fi.

- Les équipements de sécurité sans fil comme les caméras et les détecteurs de mouvement peuvent encombrer la fréquence 2.4 GHz. Les nouvelles caméras et capteurs sont compatibles Wi-Fi et peuvent se connecter à un réseau Wi-Fi domestique au lieu de l'interférer,
- Les radios et les scanners de police fonctionnent sur une large gamme de fréquences et peuvent causer des interférences avec tout autre appareil radio à proximité,

- Les moniteurs et les téléviseurs, en particulier ceux qui ne sont pas correctement blindés, peuvent provoquer des interférences pour les réseaux 2,4 GHz. Il faudrait éviter de placer le modem directement à côté d'un téléviseur, d'un moniteur ou d'un écran,
- Les articles ménagers à haute tension et à forte consommation tels que les machines à laver et les climatiseurs peuvent provoquer des interférences électromagnétiques. Si on constate une dégradation des performances du réseau Wi-Fi, il faudrait déplacer le modem plus loin.

Les interférences couche 1 sont les plus cruciales et ceci provient du fait qu'elles perturbent le protocole de sensation de porteuse (carrier sense) dont le Wi-Fi est basé sur. Le scénario complet est le suivant : Ces émetteurs non Wi-Fi vont essayer de transmettre mais leurs transmissions sont vues en tant que bruit. Cela fait que le récepteur prévu ne reçoit jamais le signal, ce qui ne renverra aucun accusé de réception à l'émetteur. Sans recevoir cet accusé du destinataire, l'émetteur d'origine attendra jusqu'à ce qu'il reçoive le paquet ACK pendant un temps appelé seuil de temporisation d'accusé de réception. Lorsque ce temps est expiré, il essaie à nouveau d'accéder au milieu en luttant et essaie de retransmettre le signal à nouveau 32 fois. Par conséquent, des taux de retransmission élevés indiquent une interférence de la couche physique avec d'autres dispositifs sans fil non Wi-Fi.

II.5. Conclusion

En raison des progrès de l'informatique et du développement de la diffusion des SIG (système d'information géographique) dans la pratique, un grand nombre de modèles de perte de chemin, la modélisation empirique ou physique dépend du développement de logiciels d'environnement de diffusion, nous nous tournons de plus en plus vers des modèles hybrides physiques/statistiques pour trouver précision/complexité Compromis sexuel Dégradation principale de propagation Si l'on analyse la puissance du signal reçu en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on peut distinguer trois types de variation de la puissance reçue :

- Affaiblissement de parcours (path loss): dû à la distance, il peut se calculer de manière déterministe ou avec un modèle empirique lorsque l'environnement se complique.
- L'ombrage ou évanouissement lent (shadowing ou slow fading): des variations lentes dues aux atténuations successives produites par de gros obstacles locaux qui causent de la diffraction.
- Évanouissement rapide ou multi trajets (fast fading ou multipath fading): des variations rapides causées par les trajets dus à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut être déterministe.

*Chapitre III : Simulations et mesures
pratiques de la dégradation des signaux dans
les canaux non-idéaux*

III.1. Introduction

Comme on a explicité dans le Chapitre II, la qualité du signal Wi-Fi peut être considérablement affectée par l'atténuation physique inévitable liée à la distance entre l'émetteur et le récepteur, les trajets multiples, les différents phénomènes influant sur l'onde électromagnétique (réflexion, réfraction, diffusion...) et les interférences avec des dispositifs Wi-Fi et non Wi-Fi. Pour y remédier, il est essentiel de comprendre les facteurs qui influencent la qualité du signal et d'identifier des solutions pour améliorer les performances du réseau sans fil. Les méthodes clés pour évaluer dégradation comprennent la simulation et les mesures réelles.

Pour simuler l'atténuation du signal Wi-Fi, on utilise des outils logiciels tels que des analyseurs de réseau ou des simulateurs environnementaux afin d'évaluer le rôle joué par différents obstacles physiques et électromagnétiques dans un environnement donné. Ces simulations permettent également d'améliorer la couverture en optimisant le placement des points d'accès, antennes et canaux. Par manque de temps, nous avons laissé ce point comme perspectives de travaux futurs.

Les mesures pratiques impliquent quant à elles l'utilisation d'équipements tels que des analyseurs de spectre Wi-Fi ou encore testeurs de réseau pour évaluer divers paramètres (puissance du signal, débit de données...). Cela aide à identifier les zones présentant une faible qualité de connexion et les points morts ainsi qu'à diagnostiquer leur cause afin que cela puisse être corrigé.

En combinant ces deux approches complémentaires, simulations et mesures pratiques, les professionnels peuvent identifier rapidement tout potentiel problème lié au Wi-Fi, diagnostiquer sa source exacte et mettre en place une solution efficace pour garantir des performances fiables sur leurs réseaux sans-fil.

III.2. Simulations de la dégradation des signaux Wi-Fi par MATLAB

III.2.1. Principales fonctionnalités du MATLAB

MATLAB est un environnement de programmation et de calcul scientifique utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et des mathématiques. Développé par Math Works, il offre une variété d'outils pour analyser, modéliser, simuler et visualiser les données.

Les fonctionnalités principales incluent un langage de programmation haut niveau avec une syntaxe intuitive pour écrire du code efficacement. Il dispose également d'une bibliothèque

étendue de fonctions mathématiques avancées telles que les opérations matricielles ou trigonométriques ainsi que des algorithmes d'optimisation.

En outre, MATLAB permet aussi la simulation dynamique grâce aux outils fournis qui peuvent concevoir modèle mathématico-physique complexe afin effectuer analyses sensibilités/paramètres/validation expérimentale très utiles notamment en ingénierie/recherche scientifique.

MATLAB peut être facilement intégré avec différents autres logiciels/langages (C, C++, Java...) ce qui facilite collaboration/utilisation transparente entre différentes technologies. Il est également largement utilisé dans l'industrie pour le développement de systèmes embarqués, le traitement de données, la conception de produits etc.

En somme, MATLAB est un outil polyvalent et puissant essentiel pour les étudiants, chercheurs/professionnels travaillant sur des domaines liés aux mathématiques, sciences et ingénierie de plus simples aux plus complexes [19].

III.2.2. Simulations

Le *Tableau III-1* présente les canaux disponibles dans la norme Wi-Fi à 2.4 GHz, chacune de largeur de 22 MHz. Les fréquences centrales, basses et hautes sont aussi fournies. Rappelons que le Wi-Fi appartient à la bande radio industrielle, scientifique et médicale (ISM) en plus du Bluetooth, fours à micro-ondes, etc.

Tableau III-1 : Caractéristiques des 13 canaux dans le standard 802.11n [18].

Canal	Fréquence Basse (MHz)	Fréquence centrale (MHz)	Fréquence haute (MHz)
1	2401	2412	2423
2	2406	2417	2428
3	2411	2422	2433
4	2416	2427	2438
5	2421	2432	2443
6	2426	2437	2448
7	2431	2442	2453
8	2436	2447	2458
9	2441	2452	2463
10	2446	2457	2468
11	2451	2462	2473
12	2456	2467	2478
13	2461	2472	2483

III.2.2.1. Simulation 1 : Cas d'interférences Wi-Fi entre canaux 1 et 2 en présence de bruit

On considère un cas d'étude d'interférences entre deux canaux Wi-Fi de fréquences centrales 2.412 GHz et 2.417 GHz, respectivement. Le rapport signal sur bruit est mis volontairement à une valeur basse de 2 dB. Le bruit est supposé un bruit blanc additif Gaussien (AWGN en anglais pour Additive White Gaussian Noise). Les résultats de simulations sont affichés sur les *Figures III-1* et *Figure III-2*. Nous constatons clairement le niveau élevé de la dégradation du signal Wi-Fi émis due aux interférences co-canaux et au bruit ce qui nécessite un filtrage robuste pour reconstituer le signal de la source.

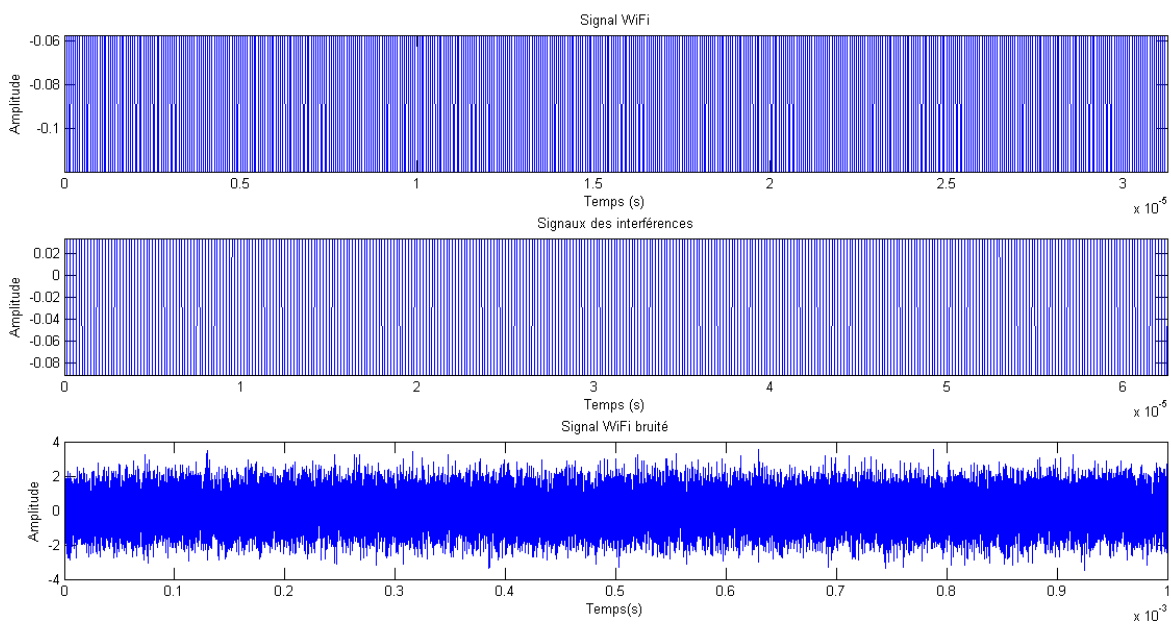


Figure III-1 : Résultats de la simulation 1 : Représentations temporelles

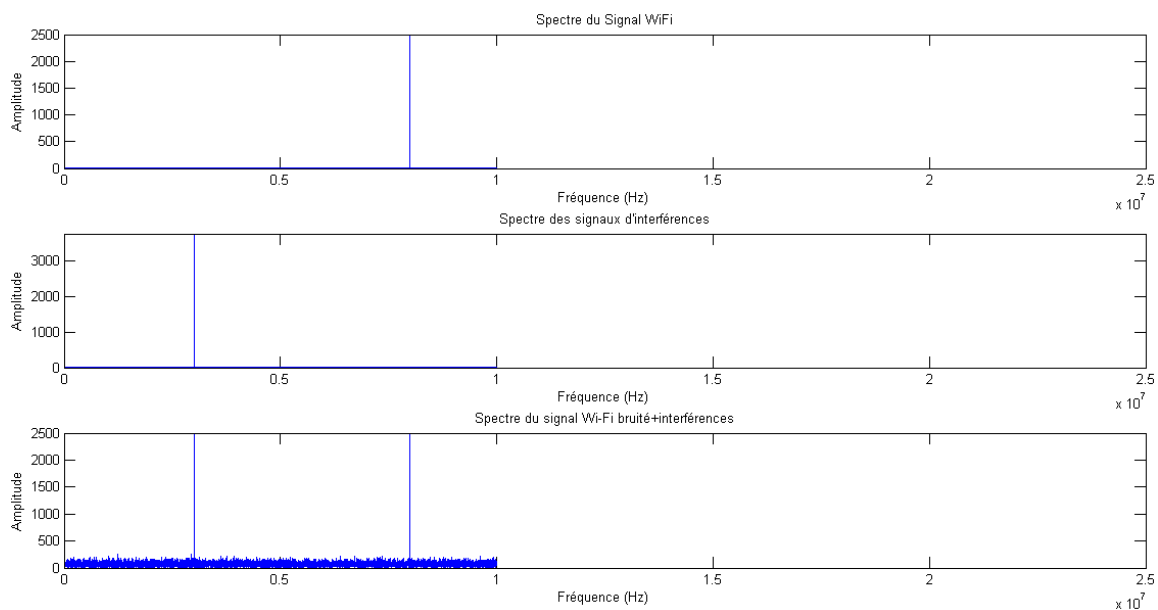


Figure III-2 : Résultats de la simulation 1 : Représentations fréquentielles

III.2.2.2. Simulation 2 : Cas d'interférences Wi-Fi entre canaux 9, 10, 11 et 12 en présence du bruit

On examine dans cette simulation l'effet d'interférences entre 4 canaux (9, 10, 11 et 12) sur la qualité du signal Wi-Fi reçu en présence de bruit avec un RSB de 2 dB. Les résultats de simulations sont affichés sur les **Figures III-3** et **III-4** et confirment que la dégradation est plus sévère lorsque le nombre des interférences co-canaux augmente, ce qui a pour effet de ralentir les transmissions d'autre part. Cette dégradation explique pourquoi le standard IEEE 802.11 utilise le protocole CSMA/CA pour empêcher cette situation d'avoir lieu.

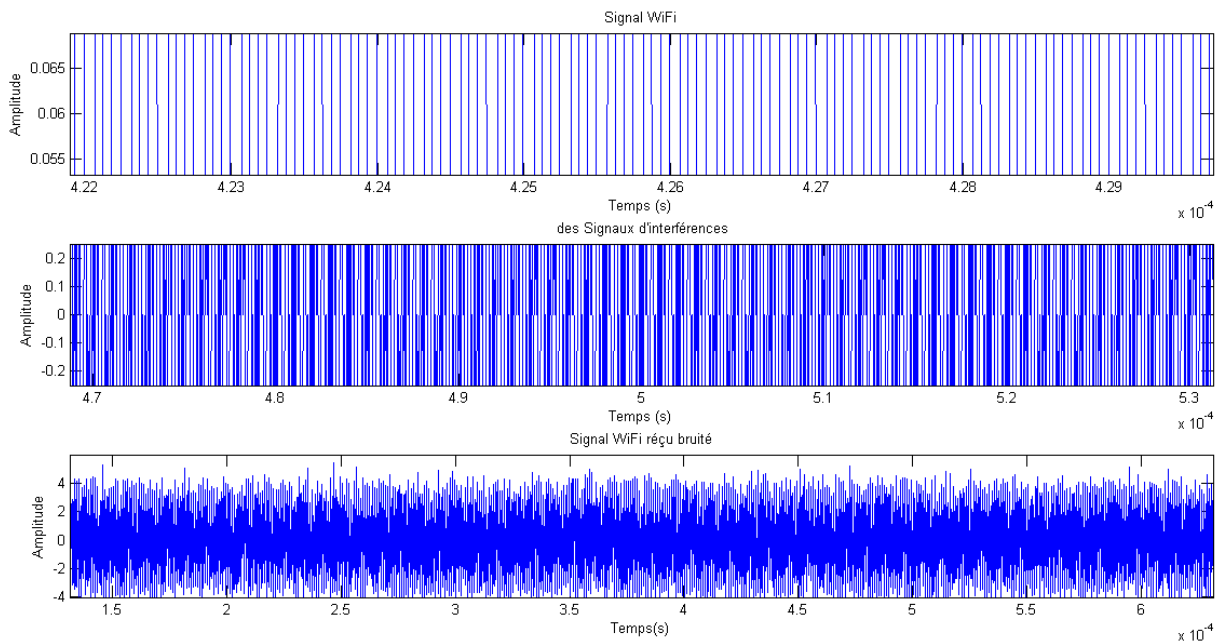


Figure III-3 : Résultats de la simulation 2 : Représentations temporelles.

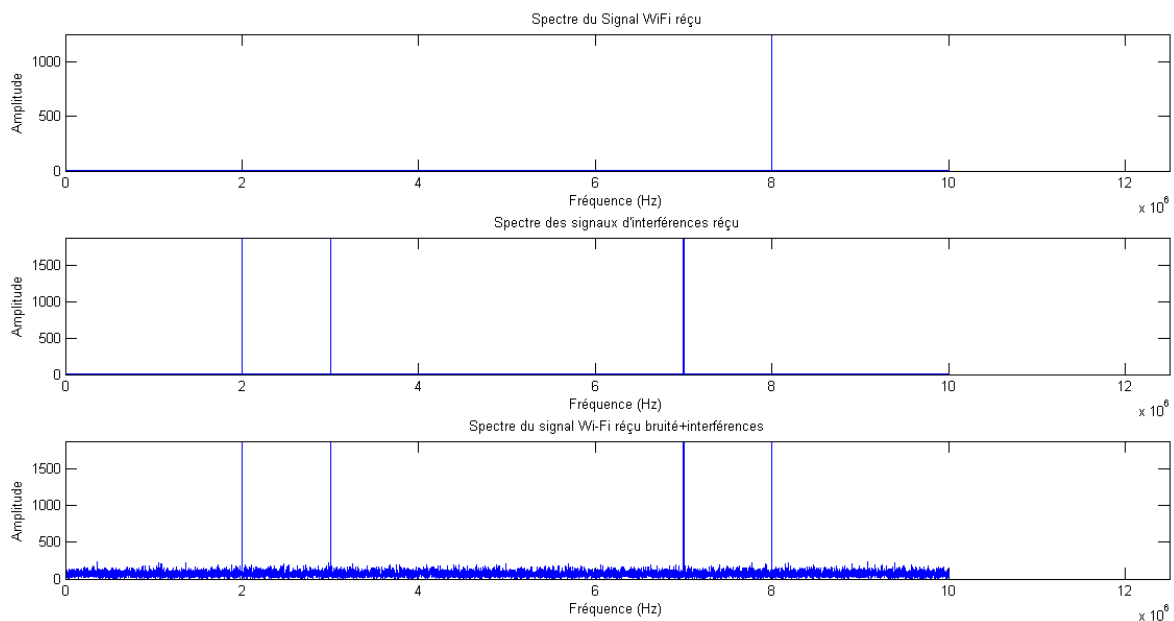


Figure III-4 : Résultats de la simulation 2 : Représentations fréquentielles.

III.2.2.3. Simulation 3 : Cas de canaux non-idéaux (fading channels) en présence de bruit

On analyse l'effet de canaux non-idéaux à évanouissement (fading multipath channels) en présence de bruit. Le rapport signal sur bruit est mis à 2 dB. Les résultats de simulations sont affichés sur la **Figure III-5**.

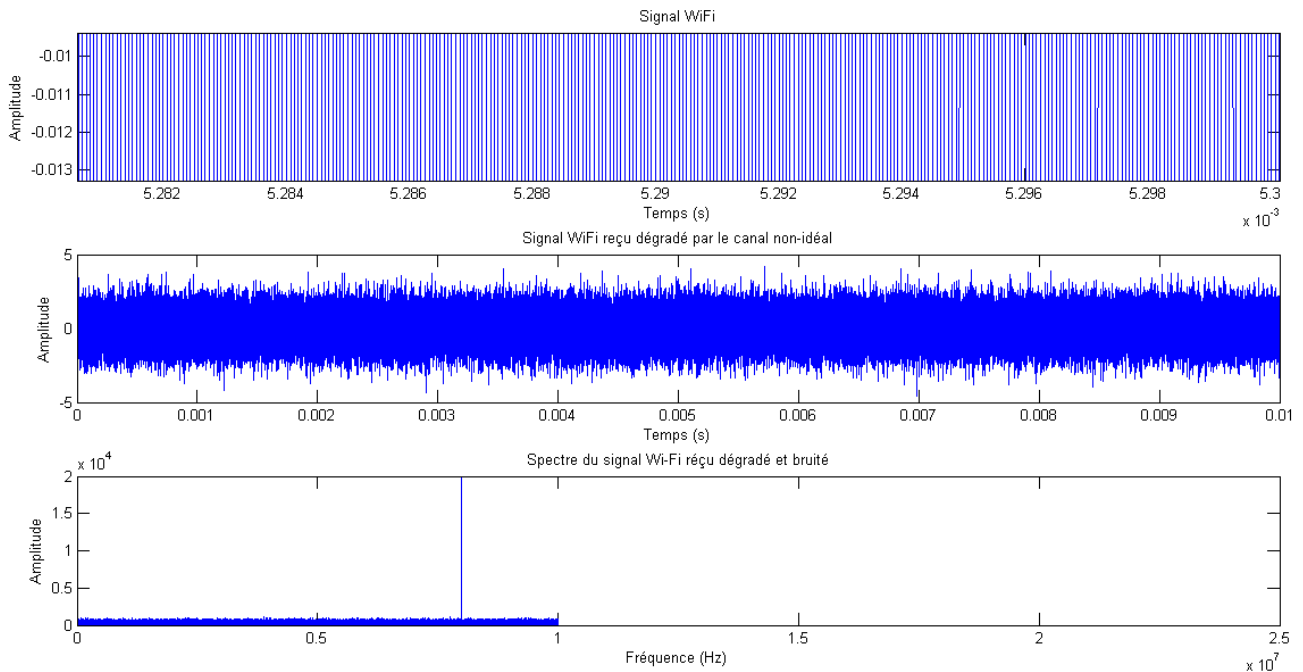


Figure III-5 : Résultats de la simulation 3 : (a) Signal Wi-Fi émis, (b) signal Wi-Fi reçu dégradé par le canal non-idéal à évanouissement par trajets multiples et (c) Spectre du signal en (b).

Les dégradations dues à l'évanouissement du canal à trajet multiple affectent sévèrement la qualité du signal reçu qui est constitué de plusieurs copies atténuées et retardés du signal émis(III.1). En fait, les obstacles provoquent en plus des interférences par trajets multiples, des dégradations supplémentaires lors du passage de l'onde EM à travers les milieux matériels causant une interaction. L'impact sur la qualité du signal Wi-Fi est de plus en plus important que le matériau conduit mieux et est plus dense.

III.3. Mesures pratiques de dégradations par le WIFI Analyzer

III.3.1. Aperçu sur l'application WIFI Analyzer

L'application WIFI Analyzer sur Androïde est un outil incontournable pour l'analyse et la surveillance des réseaux sans fil. Ses principales caractéristiques incluent [19].

- ✓ La détection de tous les réseaux à proximité avec leurs informations détaillées,
- ✓ La mesure de la force du signal en différents endroits pour optimiser le placement des équipements, ainsi que l'affichage des canaux utilisés par les réseaux voisins afin d'éviter les interférences,
- ✓ La détection de toutes sources potentielles d'interférence dans l'environnement Wi-Fi et l'offre d'une surveillance en temps réel des performances du réseau.

Certains programmes proposent même une cartographie précise de couverture ou encore un rapport sur les performances globales du réseau. En somme, cet outil complet propose également diverses fonctionnalités liées à la sécurité comme celle qui permettent notamment d'identifier tout appareil non autorisé connecté au réseau sans fil.

Remarque importante : La puissance d'émission dans WIFI Analyzer ne dépend pas des canaux non-idéaux, mais plutôt des caractéristiques de l'appareil lui-même. Les analyseurs Wi-Fi sont conçus pour mesurer la puissance des signaux Wi-Fi émis par les routeurs, points d'accès ou autres appareils sans fil.

III.3.2. Fonctionnalités du WIFI Analyzer

Un analyseur Wi-Fi fonctionne en écoutant les signaux Wi-Fi présents dans l'environnement et en mesurant leur puissance. Il ne génère pas de signal Wi-Fi lui-même. Par conséquent, la puissance d'émission dans un analyseur Wi-Fi est généralement très faible, suffisante uniquement pour permettre la réception des signaux à des fins de mesure.

La puissance d'émission dans un analyseur Wi-Fi est généralement spécifiée par le fabricant et peut varier en fonction du modèle et des caractéristiques de l'appareil. Elle est généralement exprimée en milliwatts (mW) ou en décibels-milliwatts (dBm). Les valeurs typiques de puissance d'émission pour un analyseur Wi-Fi se situent généralement dans la plage de -30 dBm à 0 dBm.

Il est important de noter que la puissance d'émission de l'analyseur Wi-Fi n'a pas d'impact direct sur les canaux non idéaux eux-mêmes, mais plutôt sur la capacité de l'analyseur à détecter et mesurer les signaux Wi-Fi existants dans l'environnement.

III.3.3. Tests pratiques et discussions

Dans cette sous-section, on décrit les résultats expérimentaux des tests pratiques de dégradation des signaux Wi-Fi conduits dans plusieurs espaces intérieurs (laboratoire signaux et systèmes, cité universitaire...). Le modem utilisé est le Wi-Fi LC522V dont les caractéristiques sont reportées sur le *Tableau III-2*.

Tableau III-2 : Caractéristiques du périphérique LC 522V.

Item	specification
Mobile Standard	3GPP LTE CAT4, maximum 150Mbps/50Mbps
Mobile Frequency	LTE-FDD : B3
Wi-Fi Standard	IEEE802.11b/g/n, 2*2 MIMO 300Mbps
Wi-Fi Frequency	2.4GHz
Interfaces	*GE, 1*POTS
Rated Power Input	12VDC/1A
Operating Temperature	0 ~ 45°C (32 ~ 113°F)
Storage Temperature	-20 ~ 60°C (-4 ~ 140°F)
Operating Humidity	0 ~ 95 non-condensing

Par défaut, le modem utilisé fonctionne à la norme IEEE 802.11n comme affiché sur la capture d'écran de la *Figure III-6*. La compatibilité descendante avec les normes ultérieures est bien évidemment garantie.



Figure III-6 : Paramètres WLAN du modem LC522V.

Le standard IEEE 802.11n, également connu sous le nom de Wi-Fi 4, est une norme de réseau sans fil qui a été publiée en 2009 et qui offre des améliorations significatives par rapport aux normes précédentes. Voici quelques-unes de ses principales caractéristiques (adapté de Chatgpt avec reformulation) :

1. Débit de données : 802.11n peut atteindre des débits de données théoriques allant jusqu'à 600 Mbps (mégabits par seconde),
2. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) : 802.11n utilise la technologie MIMO, qui permet l'utilisation de plusieurs antennes pour transmettre et recevoir des signaux sans fil. Cela permet d'améliorer la performance et la portée du réseau, ainsi que de réduire les interférences,
3. Bande de fréquences : 802.11n fonctionne dans les bandes de fréquences 2.4 GHz et/ou 5 GHz. Cette deuxième bande permet moins d'interférences par rapport à la bande de 2.4 GHz,
4. Portée : Grâce à la technologie MIMO et à d'autres améliorations, 802.11n offre généralement une portée supérieure par rapport aux normes précédentes. Cela permet une meilleure connectivité même à travers des obstacles physiques tels que les murs et les planchers,
5. Sécurité : 802.11n prend en charge des protocoles de sécurité plus avancés tels que WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2),
6. Largeur de canal : 802.11n introduit la possibilité d'utiliser des canaux de largeur de 40 MHz, ce qui permet d'obtenir des débits de données plus élevés,
7. Amélioration des performances en environnements encombrés : 802.11n utilise des techniques telles que le beamforming et le canal de retour pour améliorer les performances dans des environnements où plusieurs appareils sans fil sont actifs simultanément.

III.3.3.1. Scénario 1 : Dégradation des signaux Wi-Fi en espace libre

Conformément à la réglementation, les puissances d'émission et de réception en Wi-Fi sont faibles et donc mesurées en dBm, parfois noté dBmW, telle que $P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}})$.

La dégradation des signaux Wi-Fi en espace libre fait référence à l'atténuation physique due au milieu de propagation, aux perturbations aussi bien qu'aux interférences qui peuvent affecter les performances du signal Wi-Fi reçu même dans les conditions idéales, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a aucun obstacle physique entre l'émetteur et le récepteur. Les paramètres de mesures du **scénario 1** sont reportés sur le *Tableau III-3*. Les *Figures III-7* au *III-9* résument

les performances obtenues par l'application WIFI Analyzer en fonction des points d'accès Wi-Fi disponibles et les canaux utilisés.

Tableau III-3 : Paramètres des mesures RF du scénario 1.

Paramètres	Valeurs	Résultats
Distance (m)	10	Les canaux optimaux dans cette situation sont les canaux 9, 10, 11 et 13 car ils offrent la puissance de réception maximale, soit -60 dBm. L'atténuation mesurée à 10 m du point d'accès est -42 dBm.
Puissance émise P_e (dBm)	-18	
Puissance reçue (P_r)(dBm)	-60	
Atténuation (A) (dBm) $A = P_r - P_e$ (III- 1)	-42	



Figure III-8 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 des réseaux à CH 13 et leur qualité (Scénario 1).



Figure III-9 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 1)

Interprétations :

En plus de l'atténuation physique due à la distance qui introduit des pertes dans la puissance RF reçue et par conséquent le débit binaire en réception, les canaux non-idéaux peuvent causer à leur tour une diminution de la qualité du signal et de la vitesse du réseau Wi-Fi, même en l'absence d'obstacles physiques. Cela est dû aux interférences provenant des autres réseaux sans fil qui utilisent les mêmes fréquences, ce qui provoque des collisions de données et des retransmissions, entraînant ainsi une baisse globale de la vitesse. De plus, cela peut augmenter le temps nécessaire à la transmission des données (latence) même en étant dans un espace libre lors de déroulement du protocole CSMA/CA.

Pour améliorer ces performances, il est possible d'utiliser l'application WIFI Analyser pour identifier les canaux moins chargés et choisir ceux avec moins d'interférences venant d'autres réseaux sans fil. Il convient également de positionner les antennes du routeur afin qu'ils minimisent les interférences ou utiliser des antennes directionnelles externes pour améliorer leur réception tout en évitant les bandes plus courantes telles que 2.4 GHz au profit de celles moins saturées comme celle à 5 GHz. Enfin, certains routeurs permettent également une configuration avancée telle que l'ajustement de la puissance du signal/sensibilité aux interférences.

III.3.3.2. Scénario 2: Effets de deux murs en brique

Dans cette expérience, nous avons pris des mesures prenant en considération l'existence des obstacles opaques (dans ce scénario, deux murs en brique). L'objectif est de montrer l'évolution de la puissance du signal dans cet espace non-dégagé. Les paramètres de mesures du scénario 2 sont reportés sur le **Tableau III-4** avec les résultats associés. Les **Figures III-10** et **III-11** décrivent les performances obtenues par l'application WIFI Analyser en fonction des points d'accès Wi-Fi disponibles et les canaux utilisés. Les points d'accès Wi-Fi disponibles avec leurs paramètres respectifs sont présentés dans le **Tableau III-5**.

Tableau III-4 : Effets de deux murs en brique (scénario 2).

Paramètres	Valeurs	Résultats
Distance (m)	10	La valeur mesurée élevée de l'atténuation montre une dégradation supplémentaire du signal Wi-Fi lorsqu'il traverse deux murs, en plus de l'atténuation du parcours. La force du signal (RSSI) est mesurée en décibels (dBm) et représente la puissance du signal Wi-Fi reçu par le périphérique. Une force de signal plus élevée indique une meilleure qualité de signal. Lorsqu'on déplace à travers deux murs, on remarque une diminution de la force du signal. Cela indique la dégradation du signal due à l'atténuation des murs. On note aussi une diminution de la qualité du signal lorsqu'on se déplace à travers les murs reflétant une dégradation de la connexion Wi-Fi en raison des obstacles et des interférences.
Puissance émise (P_e) (dBm)	-18 dBm	
Puissance reçue (P_r) (dBm)	-83 dBm	
Atténuation (A) (dBm) $A = P_r - P_e$ (III-2)	-65 dBm	

Tableau III-5 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 2).

Points d'accès	Puissance reçue (dBm)	Distance à la réception (m)
A.I.O.DZ	-83	10
LTE4G	-51	3.5
Djezzy 4G	-72	39.3

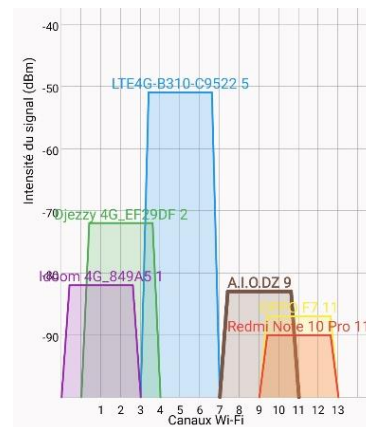


Figure III-10 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (Scénario 2).

Figure III-11 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 2).

Interprétations :

Les obstacles peuvent créer des interférences et des distorsions supplémentaires dans le signal Wi-Fi. Cela peut se produire en raison des réflexions, des diffractions et des réfractions du signal lorsque celui-ci rencontre l'obstacle. On observe des variations brusques, des sauts ou des fluctuations dans la puissance reçue mesurée.

Dans des canaux non-idéaux, les réflexions multiples peuvent être plus prononcées en présence d'obstacles. Le signal Wi-Fi peut rebondir plusieurs fois sur l'obstacle, créant ainsi des chemins multiples. Cela peut entraîner des interférences supplémentaires et des variations de puissance plus complexes dans le signal mesuré. Les obstacles peuvent également contribuer à l'augmentation du bruit dans le signal Wi-Fi.

En raison des interactions avec l'obstacle, le signal mesuré peut contenir des composantes de bruit supplémentaires provenant des sources environnantes. En raison de l'atténuation, des interférences et du bruit supplémentaire causés par l'obstacle, les performances globales du signal Wi-Fi peuvent se détériorer davantage dans des canaux non-idéaux. Cela peut se traduire par une diminution de la vitesse de transmission des données, une augmentation des erreurs de paquets ou une instabilité de la connexion.

En se servant de l'application WIFI Analyzer, on peut identifier les canaux qui sont moins congestionnés pour optimiser ses performances. Dans notre cas, il s'avère que les meilleurs canaux disponibles pour le point d'accès A.I.O.DZ sont CH 8, CH 9 et CH 10.

III.3.3.3. Scénario 3 : Effets de trois murs en brique

Lors de l'utilisation de l'application WIFI Analyzer pour mesurer la dégradation des signaux Wi-Fi à travers trois murs dans un environnement non-idéal, on constate une diminution très significative de la puissance du signal reçu par le Smartphone. Les paramètres de mesures du **scénario 3** sont reportés sur le **Tableau III-6** avec leurs résultats respectifs. Les **Figures III-12 et III-13** clarifient les performances obtenues par l'application en fonction des points d'accès Wi-Fi disponibles et les canaux utilisés.

Tableau III-6 : Effets de trois murs en brique (scénario 3).

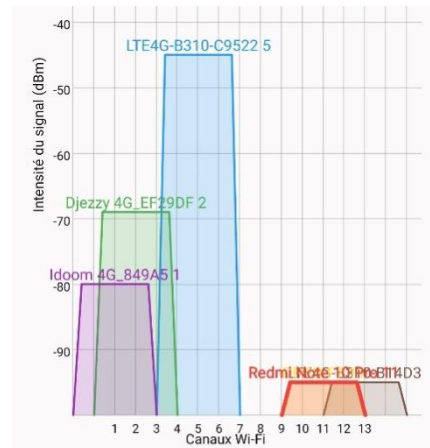
Paramètres	Valeurs	Résultats
Distance (m)	10	La force du signal mesurée en dBm représente la puissance du signal Wi-Fi reçu par le périphérique. Une force du signal plus élevée indique une meilleure qualité de signal. Lors de sa traversée des trois murs en brique, le signal RF subit plusieurs dégradations dues, d’une part, à l’interaction de l’onde EM avec la matière et, d’autre part, au phénomène de trajets multiples générant des interférences produites par des copies affaiblies et retardées du signal émis par le point d’accès Wi-Fi voir (III.2). Si la sensibilité du récepteur Wi-Fi utilisée est par exemple -95 dBm, il ne pourra pas recevoir des données à cette distance tout en traversant ces trois murs.
Puissance émise (P_e) (dBm)	-18	
Puissance reçue(P_r)(dBm)	-95	
Atténuation (A)(dBm) $A = P_r - P_e$ (III-3)	-77	

Les points d’accès Wi-Fi disponibles avec leurs paramètres respectifs sont présentés dans le **Tableau III-7**.

Tableau III-7 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 3).

Meilleurs canaux: 8, 9, 10, 11, 12, 13

Qualité du canal	Numéro de canal	Nombre de points d'accès
★★★★★★★★★☆☆☆☆	1	2
★★★★★★★★★☆☆☆☆	2	2
★★★★★★★☆☆☆☆☆☆	3	3
★★★★★★★☆☆☆☆☆☆	4	2
★★★★★★★☆☆☆☆☆☆	5	1
★★★★★★★☆☆☆☆☆☆	6	1
★★★★★★★☆☆☆☆☆☆	7	1
★★★★★★★★★☆☆☆☆	8	0
★★★★★★★★★☆☆☆☆	9	2
★★★★★★★★★☆☆☆☆	10	2
★★★★★★★★★☆☆☆☆	11	3
★★★★★★★★★☆☆☆☆	12	3
★★★★★★★★★☆☆☆☆	13	3



Points d'accès	Puissance reçue (dBm)	Distance à la réception (m)
A.I.O.DZ	-95	10
LTE4G	-45	2
Djezzy 4G	-69	28

Figure III-12 : Affichage des canaux utilisés de CH1 à CH 13 et de leur qualité (Scénario 3).

Figure III-13 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun des points d'accès actifs (Scénario 3).

Interprétations :

La force du signal représente la puissance du signal Wi-Fi reçu par le routeur. Lorsqu'on se déplace à travers les trois murs, on remarque une diminution progressive de la force du signal due aux raisons décrites dans le **Tableau III-6**.

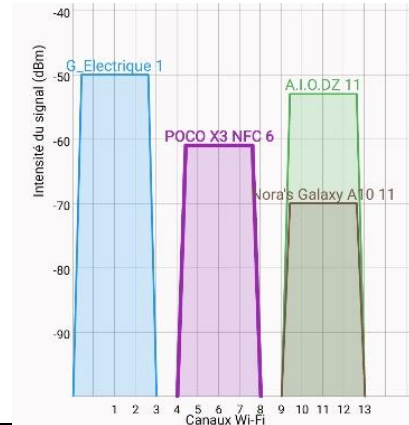
Il est important de noter que plus il y a de murs traversés, plus la dégradation du signal Wi-Fi est importante. Les murs agissent comme des obstacles physiques qui atténuent le signal Wi-Fi, entraînant une diminution de la force du signal et une dégradation de la qualité de la connexion. Cette dernière est liée au débit binaire qui représente la quantité de données pouvant être transférées sur le réseau par seconde. On constate une réduction de la vitesse de transmission, ce qui est une autre indication de la dégradation du signal conformément aux résultats théoriques du débit maximal exprimé par le théorème de Shannon de capacité de canal : $D_{\max} = B \log_2(1 + P_{\text{signal}}/P_{\text{bruit}})$. Si la puissance du signal diminue, le débit diminue à son tour jusqu'à arriver au cas extrême où : $P_{\text{signal}}/P_{\text{bruit}} \approx 0$ ce qui implique un débit nul !

III.3.3.4. Scénario 4 : Effets d'obstacles en métal

Les paramètres de mesures du scénario 4 accompagnés des constatations pratiques sont reportés sur le **Tableau III-8**. Les **Figures III-14** et **III-15** affichent les performances obtenues par l'application WIFI Analyzer en fonction des points d'accès Wi-Fi disponibles et des canaux utilisés. Le **Tableau III-9** présente les réseaux Wi-Fi détectés et les puissances mesurées lors du positionnement du récepteur derrière une armoire métallique se trouvant au Laboratoire de

recherche Signaux et Systèmes (LSS). La liste des réseaux Wi-Fi disponibles est reportée dans le *Tableau III-9*.

Tableau III-8 : Effets d’obstacles en métal (scénario 4).



Paramètres	Valeurs	Résultats
Distance (m)	10	Le WIFI Analyzer affiche une puissance reçue de -61 dBm lors du positionnement du récepteur Wi-Fi derrière une armoire métallique. Ceci s’explique par les trajets multiples qui permettent comme même au signal RF d’atteindre le récepteur. Dans le cas d’une cage de Faraday, exemple : un ascenseur, une chambre métallique blindée, un sous-sol en béton armé, etc., aucune communication Wi-Fi ne serait possible : La majorité de la puissance du signal est réfléchiée par les surfaces conductrices tandis qu’une tout petite quantité de puissance est absorbée par le métal et transformée en énergie thermique (effet de peau).
Puissance émise (P_e) (dBm)	-18	
Puissance reçue (P_r) (dBm)	-61	
Atténuation (A)(dBm) $A = P_r - P_e$ (III-4)	-43	

Tableau III-9 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 4).

Point d'accès	Puissance reçue(dBm)	Distance à la réception (m)
A.I.O.DZ	-53	4
G_Electrique	-50	3
POCO	-61	10

Figure III-14 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi reçu de chacun de points d'accès actifs (scénario 4).

Figure III-15 : Affichage des canaux utilisés de CH1 à CH 13 et d leur qualité (Scénario 4).

Interprétations:

Lorsqu'on déplace le Smartphone récepteur derrière des surfaces métalliques, on remarque une diminution significative de la force du signal. Les vitres en métal peuvent bloquer ou atténuer considérablement les ondes radio, ce qui entraîne une dégradation du signal Wi-Fi. Ces surfaces conductrices sont des obstacles particulièrement problématiques pour les signaux Wi-Fi, car elles peuvent bloquer, réfléchir ou atténuer considérablement les ondes radio. Cela entraîne une dégradation significative du signal Wi-Fi et peut limiter la portée et la qualité de la connexion.

En interprétant les résultats obtenus, nous pouvons évaluer l'impact des vitres en métal sur la dégradation du signal Wi-Fi et prendre des mesures pour améliorer la performance de notre réseau. Cela peut inclure le déplacement du routeur vers un emplacement plus favorable ne contenant aucun obstacle métallique, l'utilisation d'antennes directionnelles pour contourner les obstacles comme on le fait pour les réseaux de téléphones mobiles, l'ajout d'un répéteur Wi-Fi pour étendre la portée du signal ou l'utilisation de solutions alternatives, telles que le câblage Ethernet, pour garantir une connectivité fiable.

III.3.3.5. Scénario 5 : Effets des interférences Wi-Fi (couche 1)

On considère dans ce scénario un réseau Wi-Fi interférant plus proche que le réseau d'intérêt situé à 10 m. Les paramètres de mesures sont reportés avec les constatations pratiques sur le **Tableau III-10** tandis que les **Figures III-16** et **III-17** visualisent, respectivement, les canaux utilisés et les intensités en dBm du signal Wi-Fi de chacun de points d'accès actifs. Les paramètres des réseaux Wi-Fi sous test sont présentés dans le **Tableau III-11**.

Tableau III-10 : Effets des interférences Wi-Fi couche 1 (scénario 5).

Paramètres	Valeurs	Résultats
------------	---------	-----------

Distance (m)	10	Ces mesures montrent qu'on peut évaluer l'impact des interférences Wi-Fi et des canaux non-idéaux sur la qualité du signal Wi-Fi. Le réseau interférant a provoqué une atténuation supplémentaire de -52 dBm par rapport au scénario de l'espace libre. Nous pourrions ainsi prendre des mesures pour améliorer la performance de notre réseau, comme sélectionner un canal moins encombré. Dans ce contexte, le WIFI Analyzer nous indique que les meilleurs canaux pour le réseau d'intérêt POCO sont CH 4, CH 5, CH 6 et CH 7. On peut aussi ajuster la puissance de transmission du routeur, utiliser des équipements de réduction des interférences ou déplacer le routeur vers un emplacement plus approprié pour minimiser les interférences.
Puissance émise (P_e) (dBm)	-18	
Puissance reçue (P_r) (dBm)	-70	
Atténuation (A)(dBm) $A = P_r - P_e$ (III-5)	-52	

Tableau III-11 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 5). Le réseau A.I.O.DZ est l'interférant.

Point d'accès	Puissance reçue (dBm)	Distance à la réception (m)
A.I.O.DZ	-26	0.2
POCO	-70	10



Figure III-16 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (scénario 5).

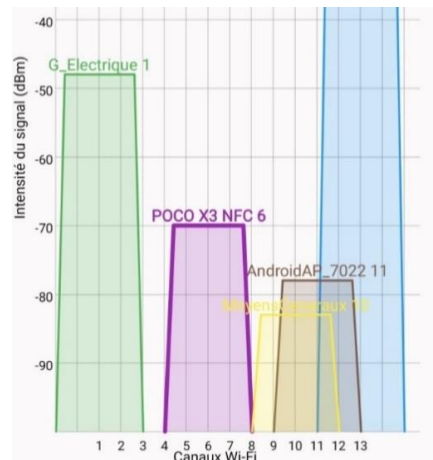


Figure III-17 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi de chacun de points d'accès actifs (scénario 5)

Interprétations:

L'application WIFI Analyzer permet de monter les canaux utilisés par les réseaux voisins (Neighboring Networks). Il affiche les réseaux Wi-Fi voisins et les canaux sur lesquels ils fonctionnent. On remarque que de nombreux réseaux voisins utilisent les mêmes canaux que notre réseau, cela peut entraîner des interférences et une dégradation des performances. Cette constatation est beaucoup plus répondeuse pour les réseaux Wi-Fi à 2.4 GHz qu'à 5 GHz.

Certains applications d'analyse Wi-Fi fournissent une mesure de la qualité du signal en prenant en compte la force du signal et le rapport signal sur bruit (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Une diminution de la qualité du signal peut indiquer une dégradation due à des interférences Wi-Fi. En constatant une réduction significative du débit de transmission à certains endroits, cela peut être le résultat d'interférences Wi-Fi comme le cas présent ou bien à cause des obstacles matériels comme on a vu dans les scénarios 2-4.

III.3.3.6. Scénario 6 : Effets des interférences non Wi-Fi (couche 2)

L'effet des interférences non-Wi-Fi sur la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux à un impact très important car les interférences non-Wi-Fi telles que les micro-ondes émettent des ondes électromagnétiques fortes capables de bloquer tout appareil qui émet des ondes électromagnétiques. Cette forte influence est justifiée par le faite que les émetteurs non Wi-Fi ne sont pas soumis au protocole de sensation des porteuses le CSMA/CA. Les paramètres de mesures du scénario 6 sont reportés sur le *Tableau III-12*. Les *Figures III-*

18 et III-19 présentent les performances obtenues par l'application WIFI Analyzer en relation avec les points d'accès Wi-Fi disponibles et les canaux utilisés.

Tableau III-12 : Effets des interférences non Wi-Fi couche 2 (scénario 6).

Paramètres	Valeurs	Résultats
Distance (m)	10	Dans ces conditions, le four micro-onde dans notre cas émet des ondes à tout moment car il n'est pas en concurrence avec le Wi-Fi. Si le nombre des interférences non Wi-Fi augmente, on constate que le nombre de tentatives du dispositif Wi-Fi d'intérêt pour accéder au point d'accès augmente, ce qui se traduit par des taux de retransmissions plus élevé.
Puissance émise (P_e) (dBm)	-18	
Puissance reçue (P_r) (dBm)	-61	
Atténuation (A) (dBm) $A = P_r - P_e$ (III-6)	-43	

Les points d'accès Wi-Fi disponibles avec leurs paramètres respectifs sont présentés dans le Tableau III-13.

Tableau III-13 : Liste des réseaux Wi-Fi disponibles (scénario 6).

Point d'accès	Puissance reçue (dBm)	Distance à la réception (m)
A.I.O.DZ	-61	10
D-Link	-78	45



Figure III-18 : Affichage des canaux utilisés de CH 1 à CH 13 et de leur qualité (scénario 6).

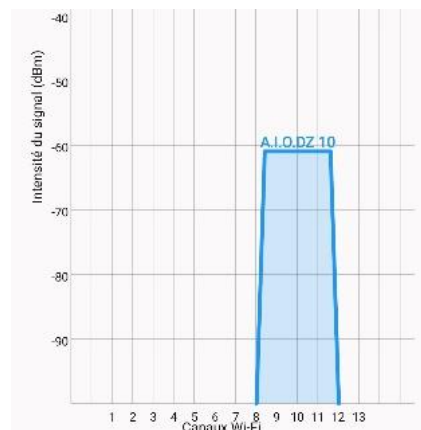


Figure III-19 : Intensités mesurées en dBm du signal Wi-Fi de chacun de points d'accès actifs (scénario 6).

Interprétations :

Les micro-ondes peuvent nuire au signal Wi-Fi en perturbant les ondes électromagnétiques utilisées pour transmettre le signal. Les effets potentiels des micro-ondes sur le signal Wi-Fi incluent une atténuation du signal, des interférences électromagnétiques et des taux plus élevés de retransmissions. Il est important de prendre en compte la proximité de la source de micro-ondes, la puissance de l'appareil, la construction des murs et la qualité des équipements Wi-Fi lorsqu'on évalue leur impact sur le réseau.

Pour minimiser ces effets néfastes, il convient d'éloigner les points d'accès Wi-Fi des sources potentielles de perturbation. Il est à noter qu'actuellement, les fours micro-ondes de haute qualité sont blindés et empêchent les ondes EM de sortir du four évitant toute sorte d'interférences non Wi-Fi.

III.4. Conclusion

En conclusion, la simulation et la mesure pratique de la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non- idéaux se révèlent être des outils essentiels pour évaluer et améliorer les performances des réseaux Wi-Fi dans des environnements réels.

Les simulations permettent de modéliser les conditions d'un canal non idéal en prenant en compte différents paramètres tels que les interférences, l'atténuation du signal et les réflexions. Elles offrent ainsi une vue d'ensemble des performances attendues et permettent d'explorer différentes configurations pour optimiser les résultats. Les simulations fournissent des informations précieuses sur la qualité de la connexion, la couverture du réseau et les performances globales.

Cependant, les mesures pratiques sur le terrain sont tout aussi essentielles pour valider les résultats des simulations et obtenir une évaluation réaliste des performances des réseaux Wi-Fi installés. Les mesures pratiques permettent de prendre en compte les particularités de l'environnement réel, telles que les interférences spécifiques, les variations de la qualité du signal et les conditions changeantes. Elles fournissent des données concrètes qui peuvent être utilisées pour ajuster les paramètres du réseau, identifier les problèmes potentiels et mettre en place des solutions adaptées. Nous avons aussi envisagé l'utilisation de l'analyseur de spectre R&S®FS300(9 KHz-3 GHz) disponible au laboratoire du département de génie électrique, mais son poids lourd, son prêt difficile et la crainte de l'endommager durant les déplacements pour mesures nous ont empêché de l'utiliser. Le lecteur est sollicité de lire le mémoire de master 2 systèmes des télécommunications intitulé : « Caractérisation des antennes filaires et imprimées

par le VNA et de l'analyseur de spectre pour travaux pratiques », juillet 2022, pour avoir toutes les informations nécessaires pour effectuer les mesures RF des puissances reçues par le FS300.

La combinaison de simulations et de mesures pratiques offre une approche complète et équilibrée pour comprendre et améliorer la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux. Les résultats obtenus grâce à ces approches permettent d'optimiser la conception des réseaux, de choisir les équipements adéquats, de sélectionner les canaux de fréquence appropriés et de mettre en place des stratégies de gestion des interférences.

En poursuivant les recherches dans ce domaine, en améliorant les outils de simulation et en développant des techniques de mesure plus avancées, nous pourrions continuer à améliorer les performances des réseaux Wi-Fi dans des environnements non-idéaux. Cela contribuera à offrir des connexions sans fil plus fiables, plus rapides et de meilleure qualité, répondant ainsi aux besoins croissants de connectivité dans notre société connectée.

En définitive, l'utilisation conjointe de simulations et de mesures pratiques permettra de mieux comprendre, évaluer et résoudre les problèmes liés à la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux, améliorant ainsi l'expérience des utilisateurs et ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans les technologies de communication sans fil.

Conclusion générale et recommandations pour les projets futurs

La dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux est un sujet important dans le domaine des télécommunications. Les canaux non-idéaux se réfèrent aux environnements où des perturbations externes peuvent altérer la qualité du signal Wi-Fi. Ces perturbations peuvent inclure des interférences provenant d'autres réseaux Wi-Fi, des dispositifs électroniques, des murs ou d'autres obstacles physiques.

Lorsque le signal Wi-Fi traverse ces canaux non-idéaux, plusieurs problèmes peuvent se produire, entraînant une dégradation de la qualité de la connexion. Voici quelques facteurs courants de dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux :

Interférences : Les signaux provenant d'autres réseaux Wi-Fi, de dispositifs sans fil tels que les téléphones sans fil ou les micro-ondes, ainsi que d'autres équipements électroniques peuvent interférer avec le signal Wi-Fi, provoquant des pertes de paquets, des ralentissements ou des interruptions de la connexion.

Atténuation du signal : Les murs, les plafonds, les meubles et d'autres obstacles physiques peuvent affaiblir le signal Wi-Fi lorsqu'il traverse ces structures, entraînant une diminution de la force du signal et une réduction de la portée.

Réflexions et diffractions : Les signaux Wi-Fi peuvent se réfléchir sur les surfaces métalliques, les murs ou d'autres objets solides, ce qui entraîne des interférences et des déphasages. De plus, la diffraction des ondes Wi-Fi autour des coins et des obstacles peut également provoquer des changements de direction et une détérioration du signal.

Bruit électromagnétique : Les sources de bruit électromagnétique telles que les appareils électriques, les éclairages fluorescents, les lignes électriques ou les moteurs peuvent introduire des perturbations supplémentaires dans le signal Wi-Fi, entraînant une diminution de la qualité de la connexion.

Pour atténuer les effets de la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux, plusieurs mesures peuvent être prises. Cela peut inclure l'utilisation d'équipements Wi-Fi de haute qualité avec des antennes adaptées, la sélection du canal Wi-Fi le moins encombré, l'utilisation de technologies de réduction des interférences telles que la modulation adaptative du signal, ainsi que la disposition stratégique des points d'accès Wi-Fi pour minimiser les obstacles physiques.

Il est également essentiel de maintenir une surveillance continue de la qualité du signal Wi-Fi dans les environnements non-idéaux, afin d'identifier les problèmes potentiels et de prendre les mesures nécessaires pour les résoudre.

En conclusion, la dégradation des signaux Wi-Fi dans les canaux non-idéaux est un défi courant dans les systèmes de communication sans fil. Comprendre les facteurs qui contribuent à cette dégradation et prendre des mesures appropriées pour atténuer ces effets permettront d'améliorer la qualité des connexions Wi-Fi dans des environnements difficiles.

Les perspectives de développement de ce travail sont nombreuses. Nous recommandons ce qui suit pour les projets futurs :

- Etude de localisation et optimisation des points d'accès Wi-Fi,
- Analyse de la dégradation des signaux Wi-Fi dans des environnements Outdoor,
- Etude des effets des conditions climatiques sur les transmissions sans fil et optiques,
- Utilisation des appareils de mesures de rayonnement électromagnétique plus robustes et plus précis pour l'évaluation des dégradations,
- Etude de la récupération de l'énergie électromagnétique ambiante par la conception des antennes adéquates afin d'alimenter continuellement les dispositifs électroniques se trouvant dans des endroits difficiles à atteindre sans avoir besoin de recharger les batteries ou les piles.

Références Bibliographiques

- [1]. (2012). *Dimensionnement D'un Réseau Sans Fil*. Tlemcen. Consulté le Février Mercredi, 2023, sur [http://www.securite-](http://www.securite-informatique.gouv.fr/gp_article251.html) (http://www.securite-informatique.gouv.fr/gp_article251.html, 2012) [informatique.gouv.fr/gp_article251.html](http://www.securite-informatique.gouv.fr/gp_article251.html).
- [2]. Benchelall, M. (2023). *RSRF_Wifi.pdf*. Cours, Mostaganem. Consulté le Février 24, 2023, sur http://efst.univ-mosta.dz/pluginfile.php/98871/mod_resource/content/1/RSRF_Wifi.pdf
- [3]. CLAUDE Servin, J.-P. A. (2013). *Réseaux et Télécoms* (éd. 4^{em} édition, Vol. 736). Paris, paris, France: Dunod. Doi: ISBN : 978-2-10-059258-6
- [4]. GUY Pujolle, O. S. (2018-2020). *Les RESEAUX* (Vol. 780). (O. S. GUY Pujolle, Éd.) PARIS, Paris, France/ Paris: 61, bd Saint-Germain. Doi: ISBN : 978-2-212-67535-1
- [5]. GUY, P. O. (2003). *Pujolle, Les Réseaux* (éd. Édition 2003, Vol. 1087 pages). Paris, Paris Cedex 05, France: Eyrolles 2003. Doi:(ISBN : 2-212-11086-3) - juillet 2002 2^e tirage : février 2003
- [6]. MOISIO, G. (2016). *LE MONDE DU WIFI* (éd. Etudes des concepts 2^{em} édition 2016). (G. MOISIO, Éd.) Consulté le Février 20, 2023, sur <https://pressbooks.pub/wifi/>
- [7]. Tanenbaum, A. (2001). *Réseaux* (éd. 4^{em} édition, Vol. 908). (V. W.-A. Freenet safor Ltd, Trad.) Paris, Paris, France. Doi: ISBN : 978-2-915236-75-0
- [8]. <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/lintensite-sonore-et-leffet-doppler/52455>
- [9]. <https://pressbooks.pub/wifispeed/chapter/attenuation-en-espace-libre/>
- [10]. Coulon, M. (2007-2008). *Canal de Propagation*. INP ENSEEIHT. TOULOUSE, TOULOUSE, FRANCE.
- [11]. Laurent, R. (2016). *Canaux de communication sans*. Grenoble, Grenoble, France. Consulté le Mai Vendredi, 2023
- [12]. Chehri, H. (2014). *ÉTUDE ET CARACTÉRISATION D'UN CANAL DE PROPAGATION POUR LES RÉSEAUX VANET*. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE. QUÉBEC: Bibliothèque Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue. Consulté le Avril Vendredi, 2023, sur <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/597/1/Chehri,%20Hamou.pdf>
- [13]. C. Decroze, D. B. (s.d.). *Canal de propagation*. Université de Limoges. Limoges: Limoges. Consulté le Avril Samedi, 2023

- [14].<https://www.panoptinet.com/cybersecurite-pratique/quels-sont-les-materiaux-les-plus-impermeables-au-wi-fi.html>
- [15] http://w3.gel.ulaval.ca/~dgrenier/ap_notes-e.pdf
- [16]<http://dspace.univsetif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1696/1/MEHASSOUELMustapha.pdf>
- [17]. Sylvain, A. (2021). *Méthodes avancées pour une ingénierie WLAN*. L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE RENNES. Rennes: RENNES, 2007. Consulté le Mai Samedi, 2023, sur <https://hal.science/tel-03201427/document>
- [18]. <https://www.malekal.com/les-canaux-wifi-et-la-bande-de-frequence-2-4-ghz-5-ghz/>
- [19]. Chatgpt Intelligence Artificielle