Méthodologie pour l'évaluation des signaux émis par les technologies émergentes. : Applications à la compatibilité électromagnétique des systèmes et à l'exposition des personnes.

Thierry Letertre

▶ **To cite this version:**

Thierry Letertre. Méthodologie pour l'évaluation des signaux émis par les technologies émergentes. : Applications à la compatibilité électromagnétique des systèmes et à l'exposition des personnes.. Autre. Supélec, 2013. Français. NNT : 2013SUPL0033 . tel-00995073

HAL Id: tel-00995073

https://theses.hal.science/tel-00995073

Submitted on 22 May 2014

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

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

N° d'ordre : 2013-33-TH

THÈSE DE DOCTORAT

DOMAINE : SPI
Spécialité : Électromagnétisme

École Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes »

Présentée par :

Thierry Letertre

Sujet :

MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉVALUATION DES SIGNAUX ÉMIS PAR LES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES:
APPLICATIONS À LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE DES SYSTÈMES ET À L'EXPOSITION DES PERSONNES

Soutenue le 11 Décembre 2013 devant les membres du jury:

Mme Françoise Paladian	Université Clermont-Ferrand	Professeur (rapporteur)
M. Marc Hélier	Université Pierre et Marie Curie	Professeur (rapporteur)
M. Lionel Pichon	Laboratoire LGEP CNRS	Directeur de Recherche CNRS (président du jury)
M. Christian Person	ENST Bretagne	Professeur (examinateur)
M. Vikass Monebhurrun	Supélec	Professeur (directeur de thèse)
M. Zeno Toffano	Supélec	Professeur (encadrant)
M. Marc Lesturgie	SONDRA	Directeur SONDRA (invité)

Remerciements

J’exprime tout d’abord ma gratitude à M. Lionel Pichon, Directeur de Recherche CNRS, d’avoir accepté la présidence du jury.

Je remercie Madame Françoise Paladian, Professeur des Universités et Directrice de l’École Doctorale Sciences Pour l’Ingénieur (EDSPI), Messieurs Marc Hélier, Professeur des Universités et Directeur du Laboratoire d’Électronique et Électromagnétisme (L2E) de l’Université Pierre et Marie Curie de Paris 6, Christian Person, Professeur à l’École nationale Supérieur des Télécommunications Bretagne (ENSTB) et Marc Lesturgie, Professeur et Directeur du Laboratoire SONDRA.

Je remercie Messieurs Vikass Monebhurrun, Professeur à Supélec au Département d’Électromagnétisme et Zeno Toffano, Professeur à Supélec au Département des Télécommunications, pour avoir accepté de m’encadrer et pour avoir largement contribué à l’aboutissement de cette thèse par leurs conseils et suggestions avisés.

Je suis reconnaissant à Monsieur Hikmet Sari, Chef du Département des Télécommunications, de m’avoir permis de mener à bien ce travail par son soutien et en me permettant d’alléger mes tâches d’encadrement et d’enseignement.

Je remercie tout particulièrement Messieurs Alain Azoulay et Patrick Staebler pour les aides et conseils qu’ils m’ont apportés tout au long de la rédaction du mémoire.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes collègues de Supélec et des différents groupes d’experts pour leur aide et leurs encouragements.

Enfin je dédie ce travail à ma famille et à mes amis.

Curriculum Vitae

Thierry LETERTRE
Né le 02 Décembre 1962 à Palaiseau (Essonne)
Nationalité Française

1998: Diplôme de Spécialisation en Informatique Systèmes et Réseaux de Supélec
1992: D.E.S.S. de Génie Industriel option Systèmes Électroniques à l'Université d'Orsay Paris XI
1991: Acquisition du niveau de Maîtrise E.E.A. au C.N.A.M
1983: D.U.T. de mesures physiques (option T.I.) à l'I.U.T. de Créteil

Entré à l'École Supérieure d'Électricité en 1983
Enseignant-Chercheur au Département des Télécommunications depuis 1998

Activités en formation initiale (première, deuxième et troisième année)

- Mineure Spectre de l'avenir (responsable)
- Réseaux locaux sans fil, majeure Télécommunications, (cours magistral)
- Les antennes, Majeure Électromagnétisme et Communications (cours magistral)
- Électronique analogique (travaux dirigés)
- Systèmes logiques et électronique associée (travaux dirigés et études de laboratoires)
- Mesures radiofréquence et compatibilité électromagnétique (études de laboratoire)
- Encadrement de projets et de Convention d'Étude Industrielle

Activités en formation continue:

- Modulations numériques multiporteuses OFDM (responsable de la session et intervenant : Techniques et systèmes de communication numérique)
- Mesures en Radiofréquence (Responsable de la session et intervenant: Modulation et techniques d'accès, Techniques de mesures radiofréquence)
- Bluetooth version 1.1 (Responsable de la session et intervenant: Bluetooth IEEE802.15.1)
- Wifi et IEEE802.11? (Responsable de la session et intervenant: Wifi IEEE802.11a/b/g/n/ac/ad/af)
- Bases de l'électronique (Intervenant: Applications en électronique numérique)
- Transmission dans les réseaux locaux (Intervenant: Réseaux locaux sans fil)

- Réseaux locaux sans fil (Intervenant: Compatibilité électromagnétique, Présentation pratique de solutions sans fil actuelles)
- Ultra Wide Band (Intervenant: Comparaison avec les systèmes sans fil existants)
- OFDM/CDMA/MC-CDMA (Intervenant: Technique de mesures en OFDM et en UMTS)
- Introduction aux antennes (Intervenant: Les antennes à la réception)
- Fondement de la compatibilité électromagnétique (Intervenant: Compatibilité électromagnétique)
- Mesure de champs en radiocommunication numériques (Intervenant: Techniques de mesures radiofréquence)
- Technique de mesure pour la télévision analogique et la télévision numérique terrestre (Intervenant: La télévision numérique terrestre)

Activités de recherche

- Systèmes de communications radiofréquences (GSM/GPRS/EDGE, UMTS/HSPA, LTE, DVB, Wifi, Wimax, Bluetooth, RFID, …)
- Brouillage et compatibilité électromagnétique (CEM)
- Exposition des personnes aux champs électromagnétiques de type ELF, BF et RF
- Systèmes de radiocommunication et CEM dans le domaine de l'aéronautique civil

Projets de recherche:

- WIMAGIC (Worldwide Interoperability MicrowAve system for next-Generation wIreless Communications): Projet Européen FP7
- POSEIDON (PilOte de Service et d'ExpérImentation Du haut débit sans fil de Nouvelle génération): Projet pôle Systématic
- MULTIPASS (MULTIPle sources exposure ASSessement) : Projet ANR
- URC (Urbanisme de RadioCommunications) : Projet RNRT

Autres activitées

- Membre du Copic/ComOp: Comité Opérationnel en charge des modélisations et des expérimentations pour l'exposition et la concertation en matière de téléphonie mobile
- Membre du Groupe Technique RF&Santé de l'ANSES
- Membre du Groupe de réflexion technique pour l'évolution du protocole de mesure In-Situ de l'ANFR
- Responsable pour le Département Télécommunications de la Plateforme de Télécommunications MultiServices (plateforme matériel et logiciel) dans les domaines radiofréquence

Résumé

La connaissance de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (EM) radiofréquences, pour le public ou pour les professionnels, est encore aujourd'hui très parcellaire. Le travail de compilation et de diffusion réalisé par l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) constitue une base de données très importante, reflet des demandes particulières de caractérisation des champs électromagnétiques, à un instant donné. L'ensemble des mesures réalisées dans l'environnement (*In-Situ*) dans le cadre de la vérification de la conformité des niveaux d'exposition aux valeurs limites réglementaires est consultable sur le site www.cartoradio.fr. Cependant, la connaissance des usages des objets communicants, en évolution constante et rapide, est aujourd'hui très incomplète. Elle a pourtant un impact très fort sur l'exposition des personnes, mais aussi sur la compatibilité électromagnétique (CEM).
De même, l'arrivée de la technologie 4G, ou le développement de l'internet mobile à haut débit nécessite de s'interroger sur son impact en termes d'évolution de l'exposition globale aux champs électromagnétiques et de CEM.

La caractéristique principale commune à ces technologies est leur aspect «pulsé», du fait de la technique de duplexage ou de la méthode d'accès à la ressource utilisée, qui a pour effet de réduire la valeur moyenne du signal, mais qui favorise la production de non-linéarité (produits d'intermodulation par exemple), dans les récepteurs à cause de leur important facteur de crête.
Aujourd'hui, c'est une approche de type "pire cas", valeur efficace ou "root mean square" (rms) pour les puissances, que l'on retrouve généralement dans la caractérisation des sources de champ électromagnétique dans l'objectif de vérifier leur conformité aux valeurs limites d'exposition réglementaires, mais avec l'arrivée des nouvelles technologies, ces mesures ne sont plus représentatives de l'exposition réelle des personnes dans leur quotidien et ne permettent plus d'évaluer leurs impacts potentiels sur l'environnement.

Ce document est une synthèse des travaux de recherche conduits pour affiner les questions de compatibilité électromagnétique et d'exposition des personnes dans ce contexte. Il a donc fallu évaluer, caractériser et définir les paramètres les plus importants des signaux rayonnés ou des niveaux des champs électromagnétiques émis par les dispositifs mettant en œuvre les technologies émergentes utilisant des hautes fréquences.
Pour compléter cette étude, on s'est également intéressé à des problématiques connexes comme par exemple l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques de très basses fréquences induits par des lignes à très haute tension ou aux émissions rayonnées par des équipements domestiques récents

intégrant des dispositifs électroniques potentiellement rayonnants (lampes à basse consommation, four micro-ondes, téléphones sans fil, …).

Le document s'articulera en cinq parties et explicitera les travaux réalisés de 2009 à 2012 dans le cadre de l'obtention de la thèse.

- Le chapitre I introduit le contexte et les motivations à l'origine des travaux et des publications associées pour la réalisation de la thèse ainsi que les différentes contributions qui ont été développées.

Les trois chapitres suivants décrivent en détail les différentes actions menées dans le cadre de ces travaux. Ils listent les différentes études, contrats ou projets de recherche avec la liste des publications ou la mention de l'écriture d'un rapport pour des contrats industriel.

- Le chapitre II traite des recherches en compatibilité radioélectrique conduites ces trois dernières années.
- Le chapitre III aborde les questions d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques générés par les nouvelles technologies radio.
- Le chapitre IV traite des questions d'exposition connexes (lampes à basse consommation, lignes à très haute tension, etc.).

Pour conclure, le dernier chapitre présente une synthèse de tous les apports et résultats obtenus au cours de ce travail tant sur le plan des connaissances détaillées de la compatibilité électromagnétique des systèmes nouveaux ou émergents que sur la problématique de l'exposition des personnes.

Je propose également des solutions pouvant permettre d'améliorer les connaissances des signaux: par exemple, des modifications de normes par la prise en compte de nouveaux paramètres plus pertinents, ou alors la modification de procédures d'étalonnage de systèmes utilisés pour caractériser l'exposition, etc.

De plus, une approche complémentaire de la compatibilité radioélectrique (CRE) est aussi proposée, en vue de faciliter le partage de fréquences entre systèmes radioélectriques, en tenant compte des aspects temporels et non plus seulement des caractéristiques fréquentielles des systèmes, ainsi que la prise en compte de paramètres liés aux statistiques de la variation de puissance en complément des valeurs maximale, moyenne et efficace.

L'évolution des systèmes radioélectriques en vue d'atteindre des hauts débits tout en gardant la meilleure efficacité spectrale est telle que leur complexité n'a cessé de croître depuis l'arrivée de la téléphonie mobile cellulaire.

Les systèmes à venir seront encore plus complexes et difficiles à appréhender d'où une nécessité d'anticipation et de proactivité afin d'éviter et non pas de subir les conséquences d'un déploiement mal contrôlé.

Table des matières

Remerciements **1**

Curriculum Vitae **2**

Résumé **4**

Chapitre 1 Introduction et motivations ***13***

Chapitre 2 Domaine de la Compatibilité Radio Électrique (CRE) ***22***

2.1. Définitions 23
2.2. Étude de modélisation / simulation (Skyguide) 24
2.3. Étude de la CRE dans deux bandes de fréquences adjacentes 35
2.4. Étude de la CRE dans la même bande de fréquence 39

Chapitre 3 Domaine de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques (1ère partie) ***57***

3.1. Contexte 58
3.2. Contribution au Projet ANR MULTIPASS 60
3.3. Étude de l'exposition passive des personnes dans le métro Parisien ou le RER. . 70

Chapitre 4 Domaine de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques (2ème partie) ***72***

4.1. Autres études liées à l'exposition des personnes 73

Chapitre 5 Conclusion/Perspectives ***81***

5.1 CEM/CRE 83
5.2 Exposition des personnes 84
5.3 L'Électro Hyper Sensibilité (EHS) ou hypersensibilité électromagnétique 85

Chapitre 6 Annexe et Références ***87***

Expertise 88
Travaux d'enseignement 92
Les nouvelles normes de systèmes de communication radioélectrique 94
L'exposimétrie 116
Le champ électrique et les mesures In-Situ 118
Appareils de mesure 121

Articles publiés **124**

Glossaire **126**

Références **127**

Tableaux et illustrations

Figure 1-1 Évolutions des technologies en télécommunication. 14
Figure 1-2 Impacts des nouveaux systèmes sans fil sur l'environnement..... 16
Figure 1-3 Comparaisons entre les anciens systèmes de communication sans fil et les nouveaux. 17
Figure 1-4 Interaction entre les 5 différents domaines d'études. 18
Figure 2-1 Spectre d'un signal compose de 52 sinusoïdes non modulées régulièrement espacées, obtenu à l'aide du logiciel Matlab. 25
Figure 2-2 Puissance normalisée des signaux obtenue lorsque toutes les sinusoïdes sont en phase (gauche) et lorsque toutes les sinusoïdes ont des phases aléatoires (droite). 26
Figure 2-3 Influence de la valeur des phases sur le PAPR. 26
Figure 2-4 Synoptique du programme Matlab Simulink utilisé pour les simulations..... 27
Figure 2-5 Exemples de constellation pour des signaux de type BPSK ou 2PSK (à droite) et 64QAM (à gauche). 27
Figure 2-6 Influence de la modulation sur la variation de la puissance du signal (à P_{RMS}=Cte). 28
Figure 2-7 Répartition de la puissance pour des signaux de type BPSK (à droite) et 64QAM (à gauche). 28
Figure 2-8 Exemple d'un signal WIMAX TDD. 29
Figure 2-9 Influence du nombre de sous porteuses sur la valeur du PAPR (à gauche) et sur le CCDF (à droite). 30
Figure 2-10 Modélisation de la densité de probabilité de la puissance d'un signal OFDM. 30
Figure 2-11 Variation de la densité de probabilité du PAPR en fonction du nombre de sous-porteuses. 31
Figure 2-12 Pourcentage du temps où le PAPR est supérieur à une valeur de référence. 32
Figure 2-13 Effet de la modulation sur la densité de probabilité d'un signal OFDM. 32
Figure 2-14 Exemple de phénomène de saturation d'un amplificateur entrainant des non-linéarités. 34
Figure 2-15 Exemple de déformations des signaux par un amplificateur non linéaire..... 35
Figure 2-16 Bandes de fréquences étudiées (en Bleu la bande Radars, en orange, vert et jaune, les bandes LTE). 36
Figure 2-17 Exemples de Radars étudiés (2 radars de l'Aviation civile et un Radar météo)..... 36
Figure 2-18 Exemple de chaine de réception typique d'un radar primaire utilisé dans l'aviation civile..... 37
Figure 2-19 Systèmes de mesure et de génération des brouilleurs WIMAX et LTE permettant de couvrir la bande complète en TDD et FDD. 37
Figure 2-20 Exemple de spectre du signal LTE 10 MHz. 38
Figure 2-21 Exemple de trame LTE FDD pleine charge (copies-écran Signal studio). 38

Figure 2-22 Exemple de trame LTE FDD vide (copies-écran Signal studio). 39
Figure 2-23 Utilisation de la bande aéronautique L avant l'introduction du futur système LDACS. 41
Figure 2-24 Banc de test utilisé au STNA comprenant les systèmes d'avionique et le générateur JTIDS/MIDS. 42
Figure 2-25 Exemple de répartition des besoins en communications lors du déroulement du vol. 46
Figure 2-26 Exemple de résultats aux tests comparatifs des technologies candidates. 47
Figure 2-27 Modèle classique de la CRE avec les émetteurs brouilleur et utile et le récepteur victime. 48
Figure 2-28 Les différentes classifications des bandes de fréquences. 49
Figure 2-29 Influence du taux d'occupation du canal du brouilleur sur la QoS du système victime. 49
Figure 2-30. Déroulement des différents tests de CRE. 50
Figure 2-31 Principaux paramètres des 2 technologies candidates. 50
Figure 2-32 les différents scénarii possibles pour les tests de CRE. 51
Figure 2-33 Masques d'émission des 2 systèmes LDACS. 51
Figure 2-34 Séparations aéronautiques utilisées lors des simulations (modèle 2D). 52
Figure 2-35 Description du banc test et exemple de tests réalisés. 53
Figure 2-36 Organisation temporelle des trames L-DACS-2. 53
Figure 2-37 Forme temporelle d'une paire d'impulsions DME. 54
Figure 2-38 Montage en mode rayonné utilisé pour les essais de CRE (en chambre anéchoïque). 54
Figure 2-39 Pourcentage de synchronisation du récepteur DME vs taux d'occupation du canal (Duty Cycle). 55
Figure 2-40 Effet de la modulation sur le fonctionnement du système DME (SIR exprimé en dB). 55
Figure 3-1 Plusieurs systèmes et plusieurs usages. 62
Figure 3-2 Chaine de mesure utilisée pour les systèmes WiFi. 62
Figure 3-3 Exemple d'aspect temporel d'émissions pour un système WiFi émulé. 63
Figure 3-4 Variation instantanée de la puissance d'un signal WIMAX. 64
Figure 3-5 Système de mesure de DAS et matériels WiFi étudiés. 65
Figure 3-6 Résultats de simulation et de mesure (même code de couleur). .. 65
Figure 3-7 Exemple de banc test utilisé pour la caractérisation des sondes isotropiques large bande. 66
Figure 3-8 Valeurs de champ E (V/m) obtenues avec deux sondes différentes pour des signaux émis à la même puissance RMS, mais utilisant des modulations différentes. 66
Figure 3-9 Différentes réponses de sondes à des signaux émis à des puissances RMS identiques modulées ou non. 67
Figure 3-10 Effet de la valeur du DC sur la valeur du CCDF. 68

Figure 3-11 Effet de la valeur du DC sur la puissance moyenne mesurée. ... 68
Figure 3-12 Position des émetteurs GSM/UMTS dans la rame de métro. 70
Figure 3-13 Mesures de champ réalisées dans une rame de métro avec ou sans la présence de personnes. 71
Figure 4-1 Exemple de matériel électronique testé. 73
Figure 4-2 Résultats obtenus pour 1 four micro-onde. 74
Figure 4-3 Exemples de lampes fluocompactes appelées aussi "basses consommations". 76
Figure 4-4 Exemples de circuit "ballast" et dispositif de mesure du champ magnétique utilisé. 76
Figure 4-5 Variation du champ magnétique émis par une LFC: récupéré sur un oscilloscope (à droite) et sur un analyseur de spectre (à gauche). 77
Figure 4-6 Quartier résidentiel le plus exposé à Champlan. 78
Figure 4-7 Corrélation entre la valeur du champ magnétique mesuré (à gauche) et la variation temporelle de la charge de la ligne THT (données RTE à droite). 79
Figure 4-8 Exemples de résultats de mesure du champ magnétique sur 24h pour une personne située loin des lignes RTE THT (à gauche) et pour une personne vivant sous les lignes (à droite). 79
Figure 6-1 Protocole de prise en charge et suivi sur 14 mois des patients. ... 91
Figure 6-2 Masque théorique et spectre réel d'un signal WiFi b. 94
Figure 6-3 Utilisation de la bande ISM par les systèmes WiFi. 95
Figure 6-4 Masque théorique et Spectre réel d'un signal WiFi g. 95
Figure 6-5 Masques d'émissions normalisés de WiFi n. 96
Figure 6-6 Effet du fading sur la puissance de réception avec et sans diversité. 97
Figure 6-7 Principe de fonctionnement de MIMO. 97
Figure 6-8 Deux techniques de "space time coding" ; MU-MIMO (muti user MIMO) vs SDMA (Space Division Multiple Access). 98
Figure 6-9 Deux exemples pour les 2,45 et 5,4 GHz d'aider le 60 GHz..... 98
Figure 6-10 Bandes de fréquences dédiées pour le WIMAX fixe. 100
Figure 6-11 Exemples de valeur de paramètres en fonction de la largeur du canal utilisé. 101
Figure 6-12 Les deux types de modulations utilisées par WIMAX. 102
Figure 6-13 Utilisation des différentes sous-porteuses pour le mode OFDMA. 104
Figure 6-14 Les différents types de modulation utilisés et Constellation correspondant aux différentes modulations. 104
Figure 6-15 Exemple de structure de trame pour WIMAX Fixe (OFDM) en mode TDD format. 104
Figure 6-16 Exemple de structure de trame pour WIMAX mobile (OFDMA) en mode TDD. 105
Figure 6-17 Exemple de spectre obtenu et d'un masque d'émission pour un signal utilisant un canal de 5MHz. 105

Figure 6-18 Évolution des spécifications du système 3GPP, l'UMTS, vers LTE. 106
Figure 6-19 Répartition des 14 blocs duplex de 5MHz dans la bande 2500-2690MHz. 108
Figure 6-20 Allocation des bandes fréquences aux opérateurs de téléphonie en France. 108
Figure 6-21 Allocation de la bande duplex correspondant au dividende numérique. 109
Figure 6-22 Les deux modes de duplexage (sens DL en bleu et sens UL en rouge). 109
Figure 6-23 Exemple d'allocation de la ressource (temps/fréquence) à des utilisateurs. 110
Figure 6-24 Architecture du standard IEEE 802.11af. 112
Figure 6-25 Architecture du standard IEEE 802.22. 112
Figure 6-26 Les principales composantes définies du standard IEEE 802.22. 113
Figure 6-27 La structure des trames: super trame et trame. 114
Figure 6-28 Structure d'une trame OFDMA. 114
Figure 6-29 Caractéristiques fréquentielles de 802.22. 115
Figure 6-30 Masques d'émission pour un système 802.22. 115
Figure 6-31 Niveaux de référence du champ E en vigueur actuellement en France. 117
Figure 6-32 Intéraction entre le champ électromagnétique et le milieu de propagation. 118
Figure 6-33 Liste des différents services à prendre en compte. 119
Figure 6-34 Exemple de protocole de mesure *In-Situ*: EN 50492. 120
Figure 6-35 Chaine de mesure ou de réception et Analyseur de spectre. ... 121
Figure 6-36 Schéma de principe simplifié d'un analyseur de spectre. 122
Figure 6-37 Différents type de détecteur d'énergie d'un analyseur de spectre. 122
Figure 6-38 Exemples de sondes isotropiques large bande avec ou sans filtre de services. 123
Figure 6-39 Schéma électrique équivalent d'un détecteur d'énergie et sa réponse à une impulsion. 123

Chapitre 1
Introduction et motivations

On constate aujourd'hui une offre sans cesse croissante de systèmes ou de matériels communicants, tant dans le domaine des télécommunications que dans la vie courante (à la maison, au bureau...). Tout le monde doit pouvoir communiquer, s'informer, avertir ou échanger avec tous et toutes, à tout moment, et cela avec des débits toujours croissants (souvent induits par l'impatience naturelle des êtres humains).

Cette demande ou ce besoin se traduit par une explosion de nouveaux standards ou normes, toujours plus performants les uns que les autres, permettant d'y répondre. Ceci implique qu'il faut de plus en plus de ressources en termes de fréquences et de bande passante, ou quand il n'y en a pas assez, il faut assurer la coexistence des systèmes radio par des techniques de partage de bande de fréquence.

Il a donc fallu optimiser les systèmes, augmenter leur efficacité spectrale tout en améliorant leur qualité de service (QoS). Pour cela plusieurs évolutions technologiques ont été mises en œuvre (cf. fig.1-1). Les modulations numériques agissent plus particulièrement sur le spectre du signal tandis que les techniques d'accès agissent sur sa forme temporelle. Ces changements de technologies se sont faits très rapidement et n'intègrent pas toujours suffisamment les aspects de CEM de CRE ou les questions relatives à l'exposition des personnes.

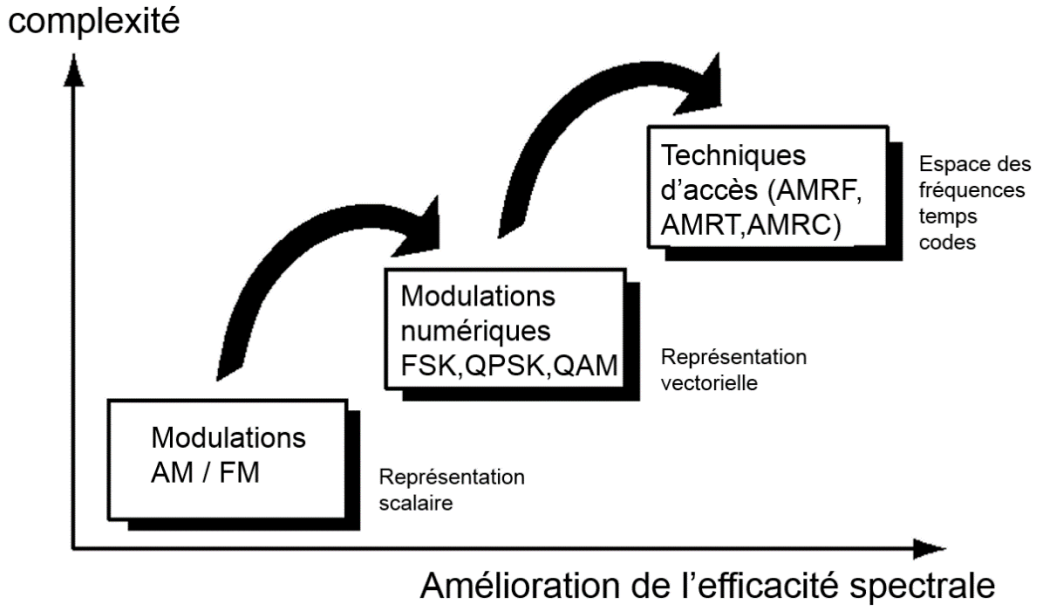


Figure 1-1 Évolutions des technologies en télécommunication.

Deux autres évolutions majeures sont apparues récemment: l'utilisation de modulations multiporteuses de type OFDM (Orthogonal Frequency Division

Multiplexing) et l'utilisation d'antennes multiples pour l'émission et la réception de type MIMO (Multiple Input Multiple Output) ajoutant une dimension spatiale à la problématique. On constate aujourd'hui que l'impact que peuvent avoir ces modifications sur l'environnement n'a pas toujours été suffisamment étudié, il y a des problèmes de compatibilité électromagnétique qui ne peuvent pas s'expliquer seulement par la coexistence fréquentielle (dans une même bande) ou spatiale (au sein d'un même appareil) de plusieurs systèmes radio.

D'autre part, de plus en plus de personnes ressentent ces nouvelles technologies comme plus perturbantes en termes d'environnement ou d'exposition.

Les travaux ont été réalisés dans le but de répondre entre autres aux questions ou préoccupations suivantes (cf. fig.1-2):

- Pourquoi les nouvelles technologies paraissent-elles plus perturbantes en termes de CEM ou d'exposition des personnes ?
- Comment faire cohabiter/coexister plusieurs systèmes au sein d'un même système et/ou dans une même bande de fréquence sans perturbation significative ?
- Comment caractériser l'impact de ces nouvelles technologies sur l'environnement et quels sont les bons paramètres qu'il faut prendre en compte ?
- Comment se prémunir ou réduire cet impact ?
- …

Ces problématiques sont d'autant plus préoccupantes que les normes et systèmes de mesures actuels ne permettent pas d'infirmer ou de confirmer ces ressentis. Ils se basent sur des références continues sinusoïdales ou "continuous waves" (CW) qui ne sont pas adaptées aux nouvelles formes d'ondes, les paramètres significatifs souvent des valeurs moyennes, efficaces ou maximales (ou crête) ne permettent pas de caractériser la dynamique des signaux. Les systèmes "anciens" étaient bidimensionnels (temps / amplitude, temps / fréquence) alors que les nouveaux sont maintenant tri, voire quadridimensionnels (temps / fréquence / amplitude / espace /).

Deux autres aspects essentiels sont encore peu pris en compte:

- L'usage que l'on fait de ces nouveaux appareils (par exemple, téléphone vs smartphone vs tablette).
- Les effets cumulatifs possibles.

Avant d'essayer de répondre à ces questions, un important travail d'analyse de l'état des lieux dans les domaines des nouvelles technologies de communication, d'étude des normes de mesures actuellement applicables dans

le cadre de la CEM et de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques et des différents matériels de mesure a été effectué.

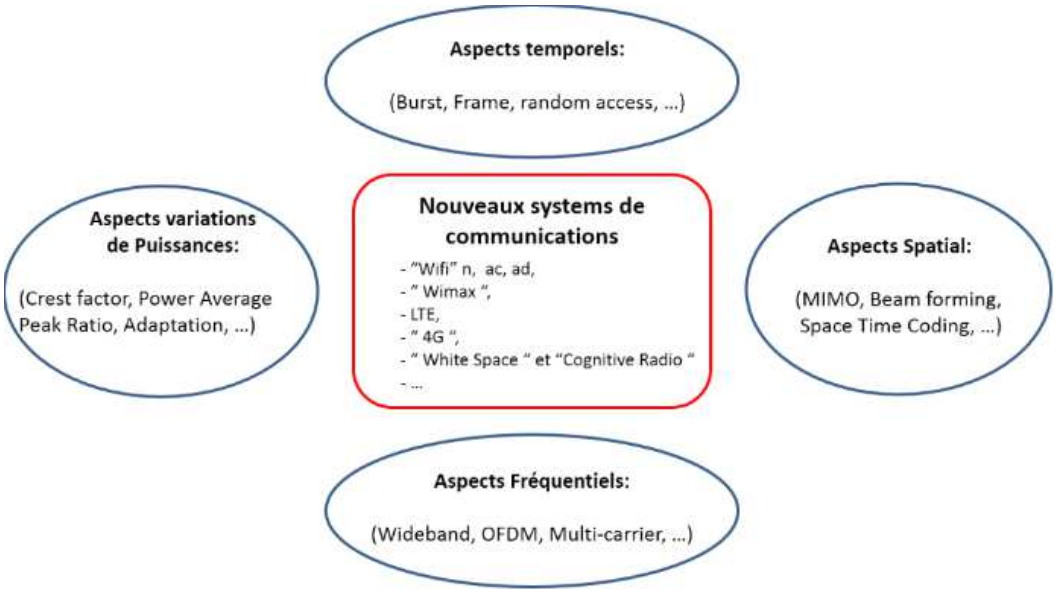


Figure 1-2 Impacts des nouveaux systèmes sans fil sur l'environnement.

La suite du document présente les travaux de recherche et les contributions qui en découlent. La figure 1-3 montre l'évolution des technologies radio depuis l'an 2000.

L'étude des nouveaux systèmes n'a pas eu pour but de faire simplement une liste la plus exhaustive possible de toutes les normes et standards existants mais d'essayer de trouver leurs principales caractéristiques communes, temporelles, fréquentielles et spatiales, de voir en quoi ils sont différents des technologies dites "anciennes".

La première phase a consisté à répertorier les différentes techniques (de modulation, de codage, de filtrage, ...) les plus utilisées dans les normes des communications numériques et à en étudier les effets sur la forme temporelle et fréquentielle du signal émis [RAP99, AGH01, PRO01] pour en déduire l'impact potentiel qu'ils pourraient avoir sur leur environnement.

Il existe deux grandes familles de normes: celles venant du monde informatique, liées aux IEEE 802.xx, comme les standards pour les réseaux sans fil de type WPAN (Wireless Personal Area Network), WLAN (Wireless Local Area Network) ou WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) et celles venant du monde des télécommunications, liées au 3GPP utilisée dans les réseaux de téléphonie mobile de 2^{e}, 3^{e} et de pré 4^{e} génération.

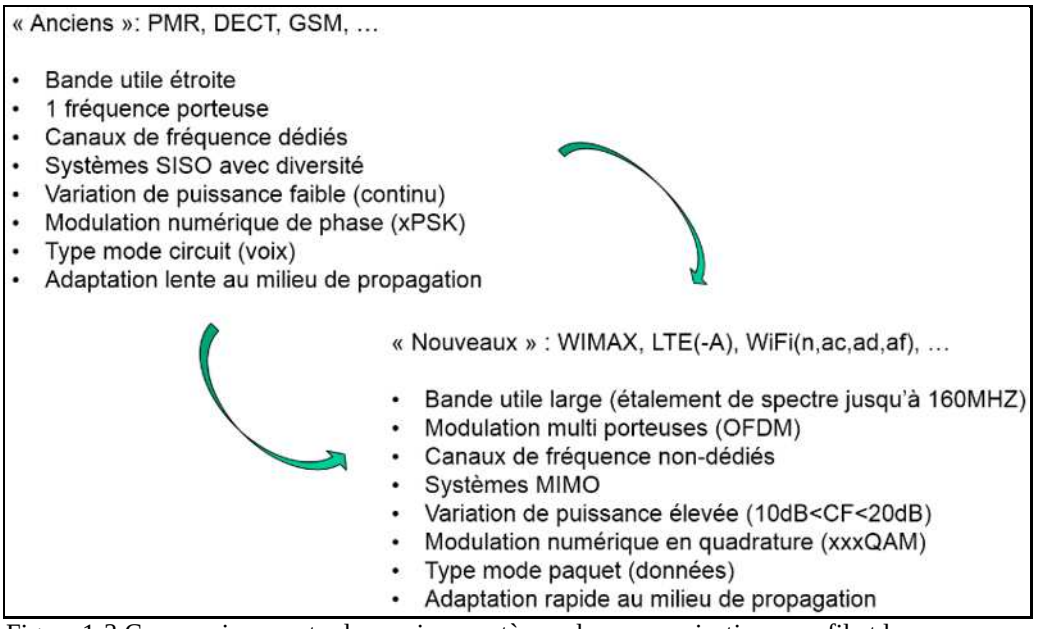


Figure 1-3 Comparaisons entre les anciens systèmes de communication sans fil et les nouveaux.

Les réseaux des prochaines générations ont aussi été étudiés, ils utiliseront massivement l'OFDM et le MIMO et intègreront deux notions très importantes: la convergence et l'adaptabilité. Le terme de "software defined radio" (SDR) ou de radio logicielle est souvent employé pour ce type de système mettant en œuvre des techniques intelligentes de "sensing" (mesures de l'environnement) et d'adaptation intelligente au milieu aussi appelé es "cognitives".
La figure 1-4 explique comment les différents travaux réalisés dans les domaines de la compatibilité électromagnétique ou radioélectrique et de l'exposition des personnes sont complémentaires et convergent vers le même besoin de caractérisation des signaux par des mesures précises.

Le deuxième point abordé a été de faire un état des lieux des normes relatives à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques en France et en Europe, en commençant par les guides de références édités par l'ICNIRP [ICN98], destinés à proposer des limites vis-à-vis de l'exposition des personnes (public et professionnels) aux champs électromagnétiques entre 0 et 300 GHz continus ou pulsés.

Il définit de façon précise les restrictions de bases (valeurs limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques de fréquence variable, qui sont établies directement à partir d'effets avérés sur la santé) et les niveaux de référence (niveaux indiqués à des fins d'évaluation pratique de l'exposition, afin de déterminer s'il est vraisemblable que les restrictions de base ne soient pas dépassées).

Certains pays ont repris intégralement ces niveaux sans changement, comme la France, mais d'autres ont pris des marges de sécurité supplémentaires, souvent sans fondement scientifique, avant de les traduire dans leur législation

propre [JOE06, AFS09, PEC09, STA09, ICN09, MIN09, MIN10, COM11, CEA11].

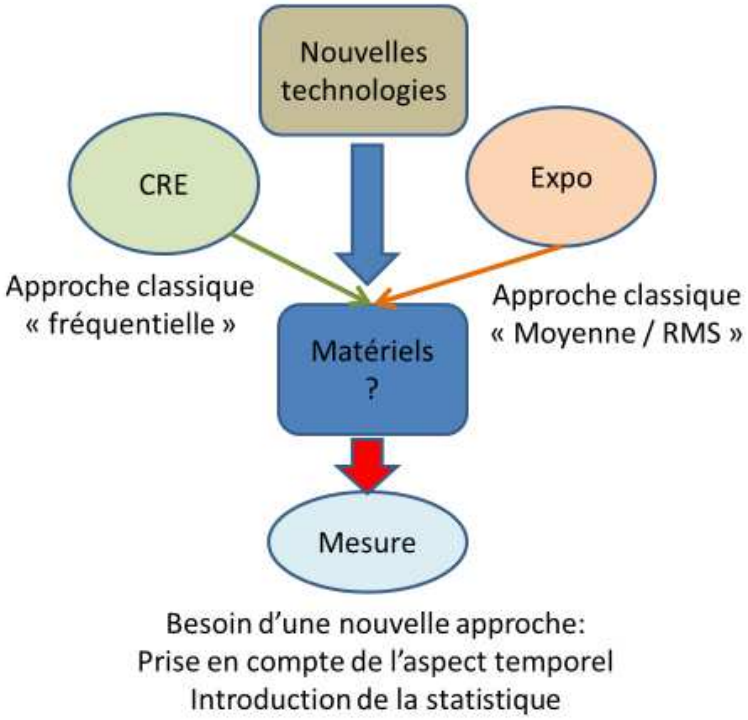


Figure 1-4 Interaction entre les 5 différents domaines d'études.

L'étude préliminaire des signaux et la connaissance des techniques utilisées a permis de faire une première classification des systèmes de communications et d'en extraire les paramètres les plus représentatifs pour les études d'exposition ou de CEM [CEN08, ANF11]. Pour la grande majorité, ils sont à large bande et varient très vite dans le temps, on dit qu'ils sont "pulsés".

La plupart des normes de mesures prennent en compte la valeur moyenne du signal, la valeur crête ou une notion dérivée comme le facteur de crête (Crest Factor ou CF) ou la valeur du rapport entre la valeur maximale et la valeur moyenne (Peak to Average Power Ratio ou PAPR).

On a réalisé une étude théorique pour évaluer l'impact de ces technologies sur des systèmes électroniques sensibles (amplificateur, mélangeur, 1er étage d'un récepteur…) pouvant entraîner des problèmes de non-linéarité.

Les résultats montrent très clairement que si la valeur moyenne n'est pas un paramètre pertinent ou protecteur pour un récepteur générique, la prise en compte des très fortes valeurs de CF ou de PAPR (>20dB) est trop restrictive pour les études de compatibilité électromagnétique.

Pour évaluer l'impact de ces nouvelles technologies sur l'exposition des personnes ou sur la CEM, il faut utiliser des outils de mesures pouvant répondre aux contraintes des protocoles de communication. L'introduction de la statistique avec un paramètre tel que le complementary cumulative distribution function (CCDF) apporte beaucoup plus de réalisme et de souplesse.

Ces appareils de mesures peuvent aussi être sensibles aux nouvelles formes d'ondes, ils ont souvent une grande dynamique de fonctionnement et sont tous étalonnés en ondes entretenues de type CW. Il existe de nombreux livres ou notes d'applications édités par les fabricants de matériels de mesures (voir Annexe: Appareil de mesures) qui décrivent le principe de fonctionnement et donnent des conseils de mesures pour des signaux ayant des caractéristiques temporelles ou spectrales spécifiques.

Mais aujourd'hui les systèmes de mesures ont évolué pour tenter de suivre les évolutions techniques des systèmes de communications, ils tendent vers le tout numérique et utilisent des fonctions de traitement de signal de type transformations de Fourier rapides (FFT) faites pour des signaux stationnaires et ergodiques pas toujours adaptés.

Deux aspects de la CEM ont été traités, la méthode classique [IAN83, ITU86, DEG90, UTE04] qui étudie l'impact d'un système radio sur un système électrique ou électronique et la compatibilité radioélectrique (CRE) qui étudie l'impact d'un système radio sur un autre système radio. Pour mener les études de compatibilité électromagnétique entre différents systèmes de télécommunications modernes, il a fallu prendre en compte les différentes normes et techniques de mesures de CRE, mais aussi tenir compte de l'évolution des usages des différents services radioélectriques existants en bande adjacente et dans la même bande de fréquence que le système victime [ITU06, ITU07a, ITU07b, ITU07c, ITU10a].

Plusieurs études de CRE entre un ancien système et une nouvelle technologie introduite dans des bandes voisines ont montré la très grande sensibilité des matériels existants et l'obsolescence de certaines normes. L'influence du canal de propagation sur la valeur du champ EM mesuré a été étudiée dans le cadre des transports en commun, lieu où l'on trouve beaucoup de sources potentielles d'émission dans un espace très limité et comportant de nombreuses structures métalliques.

Les différentes études réalisées pour l'aviation civile ont introduit des difficultés supplémentaires que sont: la spécificité des services de radionavigation et de communication aérienne et les contraintes et restrictions liées à la sécurité des personnes, source FCC [FCCxx], source Eurocontrol [EURxx] et OACI [ICAxx].

L'étude de faisabilité de l'ajout d'un futur système de communication ayant une QoS élevée dans des bandes de fréquence déjà pleines et dans un espace très restreint (co-site) puis une fois le choix de la technologie fait (L-DACS2) [EUR09a, EUR09b], les études d'impact et d'interférences du nouveau système sur son environnement proche ont conduit à la création d'un banc de mesures avec un protocole spécifique utilisé comme référence dans plusieurs autres études.

L'autre aspect fondamental de la mesure est le transducteur: la sonde ou l'antenne qui traduit le champ électromagnétique en grandeurs électriques mesurables. On a traité dans ce document que des problèmes des sondes de mesures de champ à large bande, la problématique de la réponse d'une antenne à des signaux très large bande devant être étudiée ultérieurement. La plupart des sondes de mesures de champ électrique (E en V/m) sont des détecteurs d'énergie (diodes) "large bande" qui ont été étalonnés à l'aide de signaux continus et validés sur des systèmes ou des standards de télécommunications anciens [MUR81, DUB06, FOE06, NUA07, SAU07, CAR09, CEP11].

Des études ont montré que lorsqu'elles sont soumises à des signaux complexes ou variant très vite dans le temps, il fallait introduire des facteurs de correction [RAN85, CEI05, IEEE05, SAR06, THU06]. La mesure de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques en radiofréquences se divise en deux suivant la valeur de la distance à l'émetteur: en champ lointain (quelques longueurs d'onde) où la grandeur significative est le champ E (V/m) [JOS08a, JOS08b, BOR09, JOS12] et en champ proche, où la mesure de l'exposition s'évalue en mesurant le débit d'absorption spécifique (DAS) (W/kg) [NAL06, ADA10, CAR10, MON10]. On a étudié le comportement de ces différentes sondes radio fréquence (RF) lorsqu'on les soumet à des formes d'ondes de complexité croissante: du CW à des signaux de technologies émergentes de type WIMAX (Worldwide Interoperability for microwave Access) pour les réseaux locaux sans fil ou LTE (Long Term Evolution) pour les systèmes de téléphonie cellulaire de 4^{e} génération.

Nous nous sommes aussi intéressés lors de ces travaux aux systèmes émettant de façon non intentionnelle, aux matériels domestiques, aux systèmes à basses fréquences et aux lignes de transport d'énergie [IEC98, ICN01, KRA05, CEN10, ETS10, UTE10].

La première étude en collaboration avec le Comité Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) était de mesurer le champ électromagnétique émis par les nouvelles lampes dites "de basse consommation" que sont les lampes fluocompactes ou à basse consommation (LFC/LBC) et les lampes à LED, suite à des interrogations de plusieurs associations de consommateurs ayant abouti à une saisine de agence nationale de sécurité sanitaire, alimentation,

environnement, travail (ANSES). Les normes de mesure de ces champs n'étant pas adaptées et en l'absence de protocole de mesures [CIS02, BRA04, AZC05, HUA05, YAN05, CIS06, CEI12], plusieurs propositions ont été faites et un montage a été proposé.

Enfin, toute une série d'études a été réalisée sur l'exposition des personnes aux systèmes autres que ceux de la téléphonie mobile que l'on côtoie dans la vie courante, à la maison ou au bureau émettant de façon intentionnelle (téléphone sans fil DECT, BabyPhone, …) ou non intentionnelle (alimentation, four, plaques électriques, …). Il n'existe que peu d'études réalisées sur tous les nouveaux matériels domestiques et les normes actuelles venant directement du monde industriel (CEI/CISPR) ne sont plus adaptées ou sont inexistantes [IEC98, ICN01, KRA05, CEN10, ETS10].

Une étude sur l'exposition individuelle au champ magnétique (induction) à 50Hz a été réalisée chez des personnes habitant dans des lieux proches de lignes à très haute tension (lignes de transport RTE à 225 kV) sur la commune de Champlan [EPR01, MAG06, CIG09, IEC09, UTE10]. Les personnes ont porté pendant toute une journée un mesureur de champ (induction) magnétique portatif et rempli un emploi du temps en temps réel dans le but de corréler le champ magnétique mesuré avec le lieu où l'action a été faite.

Les différents travaux réalisés, pour répondre à toutes ces attentes, ont été classés par thématique dans les chapitres suivants:

- Le chapitre II traite des recherches en compatibilité radioélectrique conduites ces cinq dernières années.
- Le chapitre III traite des questions d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques liés aux nouvelles technologies radio (WiFi, WIMAX, LTE, …).
- Le chapitre IV traite des questions d'exposition connexes (lampes à basse consommation, lignes à très haute tension, etc.).
- Le chapitre V est une conclusion associée aux perspectives induites par le travail de thèse ou des propositions sont faites pour répondre à l'inadéquation des moyens mis en œuvre par rapport aux objectifs en termes de mesures.
- Les annexes décrivent les caractéristiques des principaux systèmes radioélectriques émergents qui ont été étudiés dans le contexte de la thèse, mais aussi dans le cadre de mes enseignements. Elles comportent également diverses informations complémentaires sur les normes d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques non ionisants et sur les appareils de mesures et la métrologie associée.

Chapitre 2
Domaine de la Compatibilité Radio Électrique (CRE)

Dans ce contexte, on présente ici trois études visant à illustrer certaines problématiques de CRE, la première étant une étude de simulation pour l'aviation civile suisse: Skyguide (équivalent de la Direction Générale de l'Aviation Civile: DGAC en France), la seconde concerne la coexistence de plusieurs systèmes radio en bande adjacente et la dernière, la coexistence de plusieurs systèmes dans la même bande de fréquence.
Avant d'entrer dans le détail des différentes études dédiées à ce domaine, il est indispensable de définir quelques notions, dont la principale: la compatibilité radioélectrique.

2.1. Définitions

Ci-dessous quelques termes importants qui vont être utilisés dans le chapitre:

CRE (Compatibilité Radio Électrique): étude de la compatibilité entre systèmes radioélectriques au niveau de l'accès antennes.

PAPR (Peak to Average Power Ratio): rapport entre la valeur maximale que pourrait prendre un signal et sa valeur moyenne généralement exprimé en dB

$$PAPR\ (dB)\ =\ 10log\left(\frac{P_{peak}}{P_{moy}}\right) \tag{1}$$

CF (Crest Factor): paramètre très proche du PAPR, mais exprimé en tension

$$CF\ =\ 20log\left(\frac{V_{peak}}{V_{moy}}\right) \tag{2}$$

CCDF (Complementary Cumulative Density Function): probabilité pour que la puissance d'un signal soit supérieure à k fois sa valeur moyenne.

Efficacité spectrale: elle caractérise la capacité d'un système à transmettre un nombre de bit/s utile par Hz de bande passante et dépend du type et de l'indice de modulation. Plus la valeur, en bits/Hz, est grande, meilleur sera son efficacité spectrale.

2.2. Étude de modélisation / simulation (Skyguide)

Cette étude visait à caractériser certains signaux de radiocommunication numérique récents et à modéliser l'étage d'entrée d'une chaine de réception pour un système radio aéronautique.

L'objectif était de définir les paramètres les plus pertinents qui permettent de décrire de la façon la plus synthétique possible l'impact ou l'influence que peut avoir un système de radiocommunication sur son environnement, compte tenu des aspects temporels et fréquentiels des signaux produits.
Le point de départ de cette étude a été la prise en compte des résultats de plusieurs articles et études qui ont analysés l'influence de la forme d'onde des signaux (aspect temporel et fréquentiel) [SHA49, AND01, WUN04] sur la valeur du PAPR ou du CF. D'autres ont modélisé les effets des non-linéarités des composants électroniques et plus particulièrement des amplificateurs [BUR03], dans les chaines de réception, provenant de signaux multi-porteuses [SHA01, DIN01, SHA03, LOU05]. Les documents de références en termes de CEM [IAN83, DEG90] et les normes et réglementations [JOE99, ETS02, CEP02, JOE04, UTE04] ne sont plus adaptées aux nouvelles formes d'onde des signaux de télécommunication actuels, d'où le besoin de faire évoluer les textes.

Une étude complète de chaque nouvelle norme (WiFi n, ac, ad et af pour les WLAN, LTE, LTE-Advanced) et WIMAX mobile et gigabit pour la téléphonie mobile) a été faite pour recenser toutes les techniques de modulation, de codage, d'accès et de multiplexage (cf. Annexe : nouvelles normes de systèmes de communication radioélectrique).
Les aspects modulations ont été particulièrement approfondis, car ils sont les plus représentatifs. L'OFDM étant la technique de modulation multi-porteuses la plus employée dans les systèmes actuels et celle qui pourrait être perçue comme la plus perturbante en terme de CF, l'accent a donc été mis sur les signaux de type OFDM, comme le montrent les simulations suivantes.

Un signal OFDM est constitué de N sous-porteuses modulées régulièrement espacées, caractérisé par la fonction suivante:

$$y_{OFDM}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} c_i e^{2j\pi f_i t} \tag{3}$$

où c_i représente le symbole transmis et f_i sa fréquence porteuse.

Il peut être assimilé, pour des modulations numériques à amplitude constante (de type modulation de phase numérique: PSK ou modulation de fréquence

numérique: FSK) à la somme de N sinusoïdes d'amplitudes identiques, mais de phases variables φ_i, caractérisée par la fonction suivante:

$$y_e(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

Les résultats obtenus par la modélisation d'un signal, constitué de 52 sinusoïdes non modulées régulièrement espacées, par exemple : WiFi utilise 52 sous-porteuses (SP), à l'aide du logiciel Matlab montrent que la forme spectrale (cf. fig. 2-1, Dirac régulièrement espacés) est fixe et ne dépend pas du choix des phases, mais que la forme temporelle est très dépendante de la valeur de la phase des différentes composantes au moment de la recombinaison (cf. fig. 2-2).
Nous voyons que pour un même signal multi porteuses, émis de façon continue (pas d'impulsion), suivant la technique de mesure utilisée: en fréquence avec un analyseur de spectre ou temporelle à l'aide d'une sonde large bande, pour une même puissance efficace émise, l'impact peut être différent suivant le type de la « victime ».

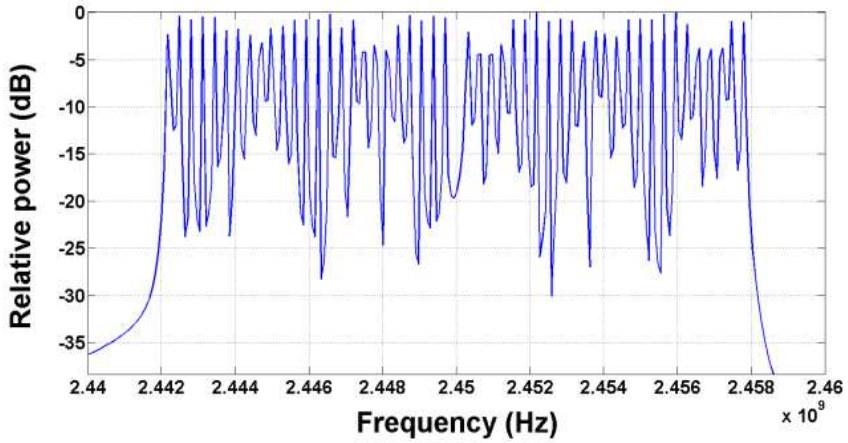


Figure 2-1 Spectre d'un signal compose de 52 sinusoïdes non modulées régulièrement espacées, obtenu à l'aide du logiciel Matlab.

La valeur de la phase ne modifie en rien le spectre, par contre l'aspect temporel peut être très différent. Le PAPR ou CF du signal varie de 6 à 17dB pour ce type de signal (cf. fig. 2-2). Les valeurs de phases choisies ici sont extrêmes (ni toujours l'un, ni toujours l'autre en pratique), mais possibles pour un signal OFDM réel, les variations que l'on peut obtenir sont très rapides et peuvent ne pas être détectées dans le cas de l'utilisation d'une sonde ayant un temps de réponse très supérieur aux durées d'impulsion des signaux. La puissance crête affichée peut donc être sous-estimée.

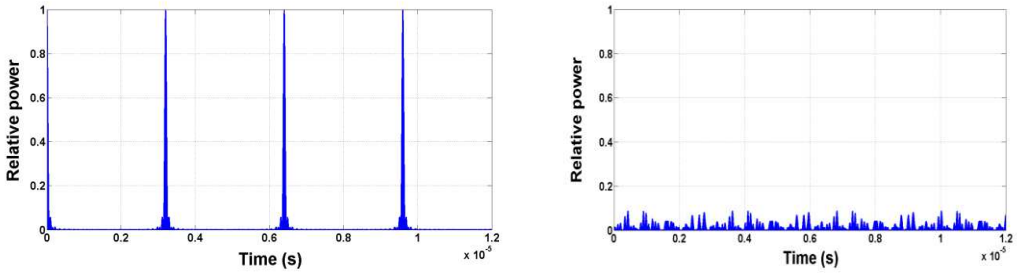


Figure 2-2 Puissance normalisée des signaux obtenue lorsque toutes les sinusoïdes sont en phase (gauche) et lorsque toutes les sinusoïdes ont des phases aléatoires (droite).

La figure 2-3 montre les courbes de CCDF obtenues pour les deux valeurs de phases. L'axe des abscisses est gradué de P_{rms}+0db (origine en bas à gauche) à P_{rms}+20dB et l'axe des ordonnées est gradué 100% à 0,00001% (de haut en bas à gauche).

La courbe "phases aléatoires" sur la figure 2-3 (en bleu) se confond bien avec la courbe que l'on aurait obtenue pour du bruit blanc gaussien (en rouge) puis s'en écarte à partir de la valeur P_{rms}+6dB du fait du nombre de fréquences limité (52 SP) utilisé. Tandis que la courbe "en phase" (en gris) est presque plate, c'est-à-dire que toutes les valeurs de puissance sont équiprobables et sature à P_{rms}+17dB qui correspond bien à 10Log(52).

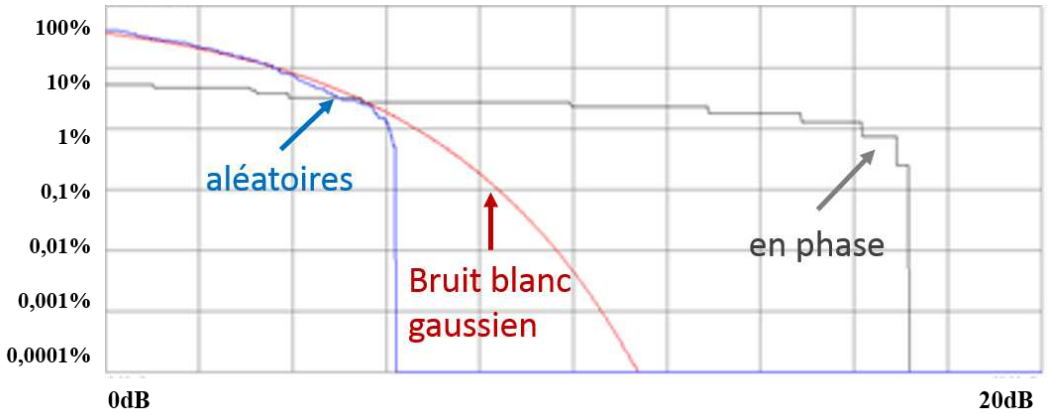


Figure 2-3 Influence de la valeur des phases sur le PAPR.

Après avoir étudié l'influence que peuvent avoir les signaux à base de multi-porteuses (non modulées) sur la mesure, il a fallu regarder si la modulation ou le codage pouvait avoir un effet sur les caractéristiques du signal.

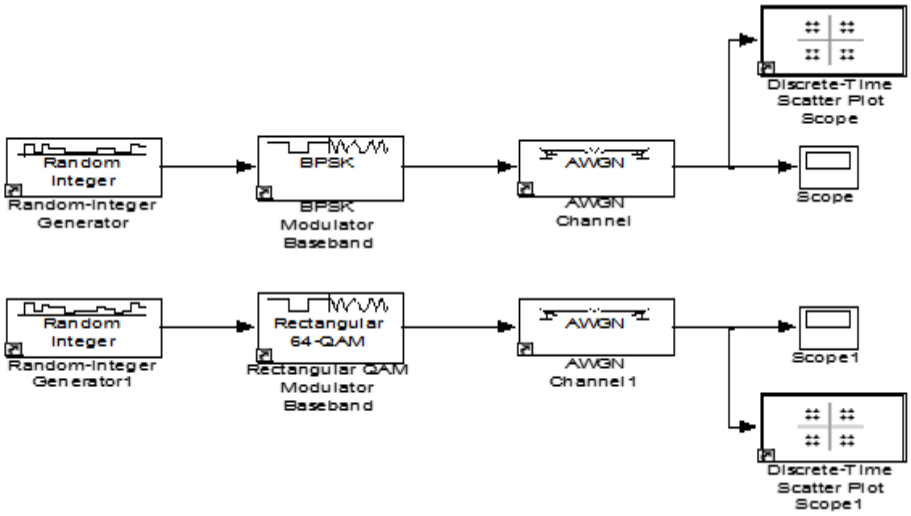


Figure 2-4 Synoptique du programme Matlab Simulink utilisé pour les simulations.

Les tests se sont portés sur deux grandes catégories de modulations elles aussi très utilisées dans les systèmes de télécommunications modernes: les modulations de phase xPSK ayant une amplitude constante et les modulations en quadrature xxQAM (ou x/xx représente le nombre d'états utilisés par la modulation, typiquement 2, 4, 16, 32 ou 64). La figure 2-4 montre le synoptique du programme Matlab/Simulink utilisé pour les inter comparaisons.

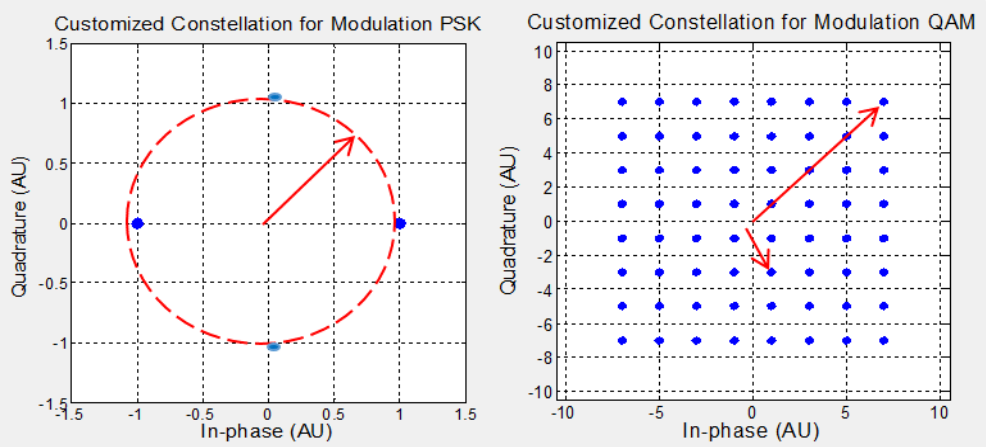


Figure 2-5 Exemples de constellation pour des signaux de type BPSK ou 2PSK (à droite) et 64QAM (à gauche).

Les deux constellations (cf. fig. 2-5) et la variation de la puissance du signal dans le temps (cf. fig. 2-6) obtenues pour les deux types de modulation montrent bien une "variabilité" plus grande pour la modulation en quadrature ainsi qu'une amplitude plus grande de l'ordre quelques dB qui correspond bien à la différence des amplitudes des vecteurs ci-dessus (cf. fig. 2-5) lorsque l'on

normalise la valeur rms des signaux (comparaison à puissance moyenne constante).

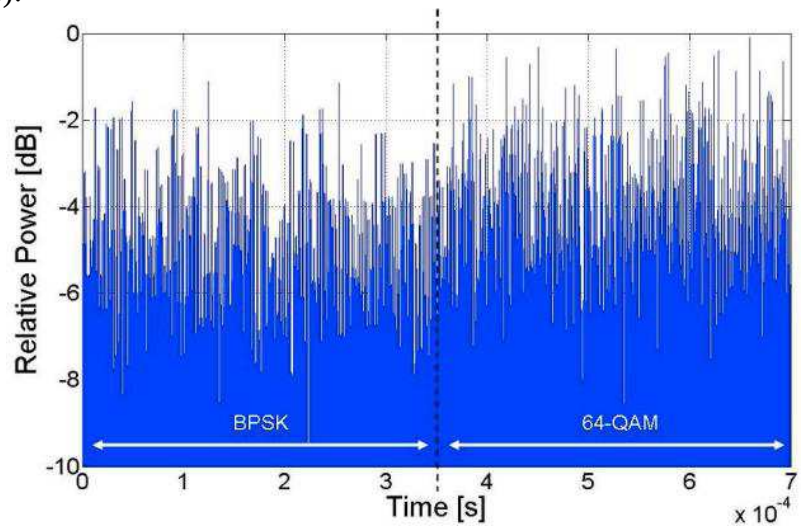


Figure 2-6 Influence de la modulation sur la variation de la puissance du signal (à P_{RMS}=Cte).

Deux versions d'un signal monoporteuse utilisant deux types de modulation ont été comparées sur la figure 2-7. Les courbes de répartition de puissances montrent bien les différences entre les xPSK et xxQAM: un pic étroit (au bruit près) pour BPSK, ce qui se traduit par une amplitude constante (sans les passages à zéro) et une répartition plutôt gaussienne pour le 64QAM indiquant des variations d'amplitude de quelques dB.

Les résultats des deux simulations: effets des multi-porteuses et de la modulation montrent que le paramètre qui est potentiellement le plus perturbant est le nombre de sous porteuses utilisées par un signal du fait de sa valeur de PAPR élevée.

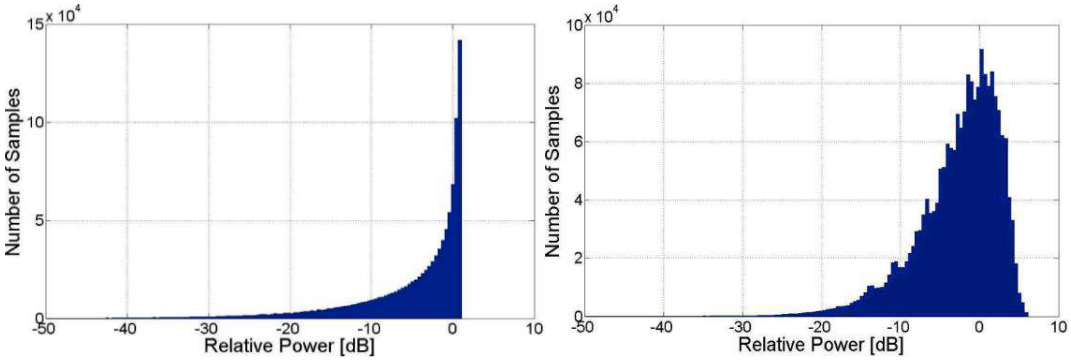


Figure 2-7 Répartition de la puissance pour des signaux de type BPSK (à droite) et 64QAM (à gauche).

La figure 2-8 montre les variations de l'amplitude d'un signal réel de type WIMAX émis par une station de base vers un terminal (TDD Downlink) sur un temps de 2 trames. Deux "bursts" différents apparaissent (la partie Uplink

de la trame n'étant pas détectée) où les données ont été envoyées en utilisant une modulation 64QAM sur le premier et une modulation QPSK sur le deuxième, la puissance moyenne du signal étant restée constante. Les résultats obtenus à l'aide d'un analyseur de spectre en mode "SPAN Zero" montrent des variations atteignant 10dB.

Les résultats précédents montrent que pour des signaux à variations d'enveloppe rapides, comme ceux utilisant l'OFDM, la connaissance de la valeur moyenne ou RMS n'est plus suffisante pour être le seul paramètre à prendre en compte dans les problèmes de CEM ou pour l'estimation de l'exposition des personnes. Les signaux étant de plus en plus large bande, leurs variations s'apparentent de plus en plus à un signal de type "bruit", la valeur crête n'est plus un paramètre aussi pertinent bien que très protecteur.

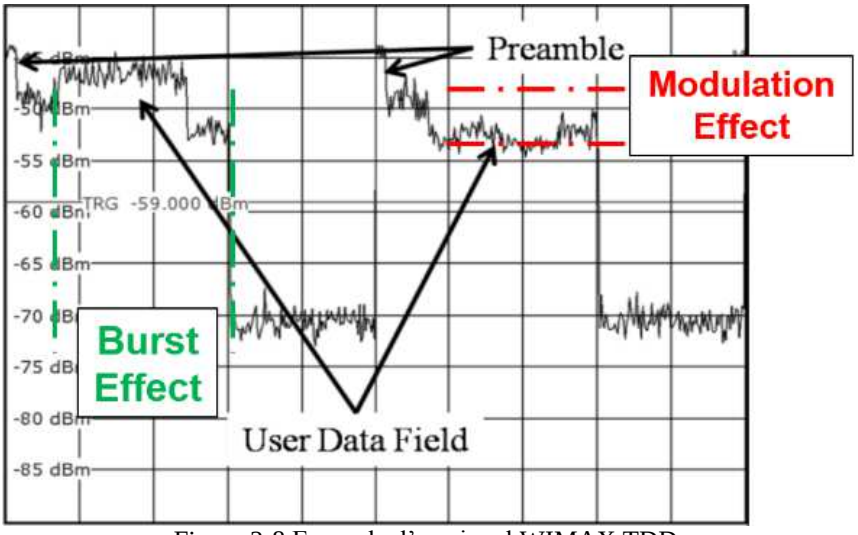


Figure 2-8 Exemple d'un signal WIMAX TDD.

L'utilisation des valeurs du PAPR ou du CF est une première réponse à la problématique. Pour la suite de cette étude théorique nous n'utiliserons pas la description physique du PAPR tel que définie par l'équation (1) mais la formulation suivante:

$$PAPR = \frac{\max(|s(t)|^2)}{E[|s(t)|^2]} \tag{5}$$

Elle représente en fait l'écart maximal entre la valeur moyenne ou RMS du signal s(t) et la valeur maximale, c'est une valeur qui est unique pour un signal donné et dépend directement du nombre de sous-porteuses pour un signal OFDM. On peut montrer, en première approximation, que la valeur du PAPR ou du CF augmente grandement avec le nombre de sous-porteuses d'un signal OFDM.

$$PAPR_{total}^2 \leq \sum_{i=1}^{Nsp} PAPR_i^2 \quad \rightarrow PAPR_{total} = \sqrt{Nsp} * CF \tag{6}$$

si toutes les sous-porteuses ont toutes la même valeur de PAPR: $PAPR_i = CF \; \forall i$

Dans la réalité des techniques de réduction de PAPR sont utilisées dans les systèmes WIMAX ou LTE et permettent de réduire la valeur du CF à moins de 20dB quel que soit le nombre de sous-porteuses constituant le signal OFDM.

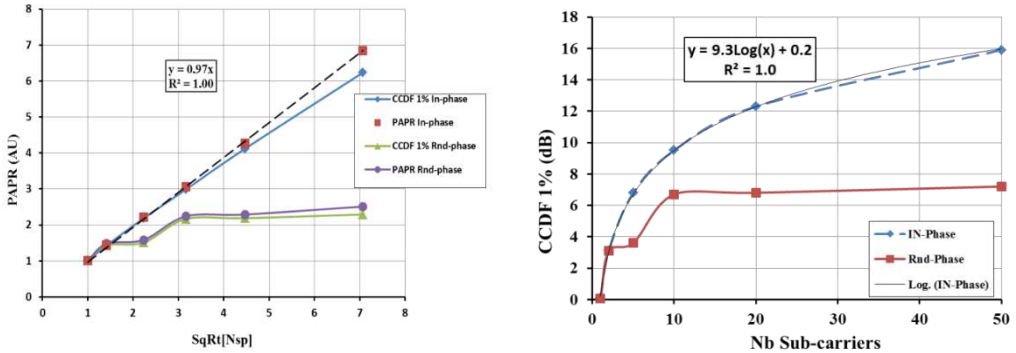


Figure 2-9 Influence du nombre de sous porteuses sur la valeur du PAPR (à gauche) et sur le CCDF (à droite).

Cette valeur est maximale quand toutes les SP sont en phase et d'amplitude maximale, elle est intéressante, mais a donc une très faible probabilité d'arriver. Il serait plus intéressant d'utiliser un autre paramètre dérivé qui tiendrait compte de la probabilité d'atteindre une valeur donnée: le CCDF.
Pour un signal de type OFDM, on peut montrer que la densité de probabilité du signal suit une loi de Rayleigh (théorème central limite):

$$\mathrm{f}(x\,;\sigma) = \frac{x}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\,paramètre\ \sigma > 0\ et\ x \in [0,\infty[\,) \tag{7}$$

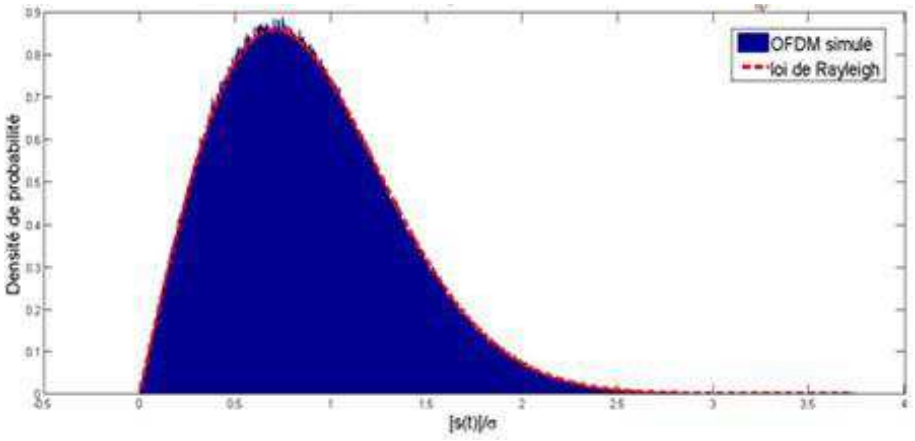


Figure 2-10 Modélisation de la densité de probabilité de la puissance d'un signal OFDM.

Les courbes obtenues (cf. fig. 2-10), pour un signal OFDM à 2048 SP et une modulation 64QAM, montrent que le modèle utilisant une loi de Rayleigh suit bien la courbe de l'OFDM. Il peut donc être utilisé pour caractériser un signal dans les calculs de compatibilité électromagnétique en remplacement des valeurs moyennes ou rms, (offrant une protection insuffisante pour des signaux de type OFDM), ou de la valeur de crête (valeur maximale qui surprotège par rapport à une valeur de très faible probabilité d'apparition, car il faut que toutes les sous-porteuses se retrouvent en phase, par exemple $1/2048^6$ pour 2048 SP et 64QAM**)**.

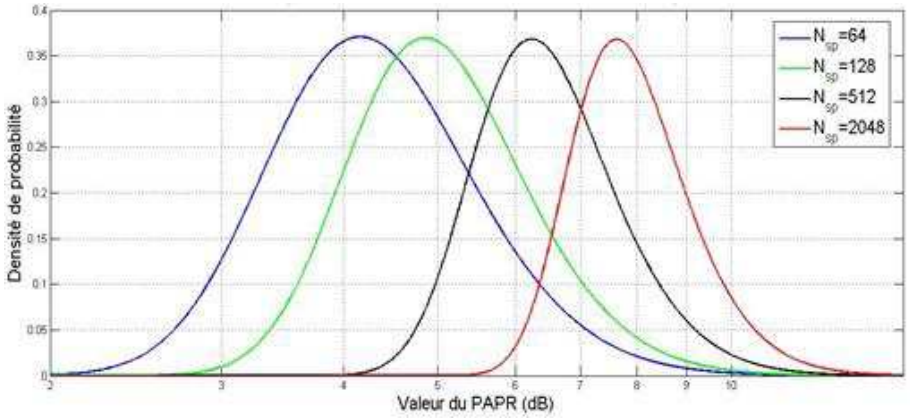


Figure 2-11 Variation de la densité de probabilité du PAPR en fonction du nombre de sous-porteuses.

Les courbes figure 2-11 montre que les paramètres x et σ du modèle doivent être ajustés en fonctions du nombre de SP du signal OFDM.

Ce nouveau paramètre, le CCDF permet d'adapter le niveau de protection aux contraintes du signal victime en prenant en compte la QoS demandée et la probabilité de brouillage.

Prenons un cas simple: pour un système fonctionnant en moyenne 10% du temps, on pourrait adapter le brouilleur (puissance et distance) pour que le niveau critique (valeur de CCDF) ne soit pas dépassé pendant plus de 90% du temps.

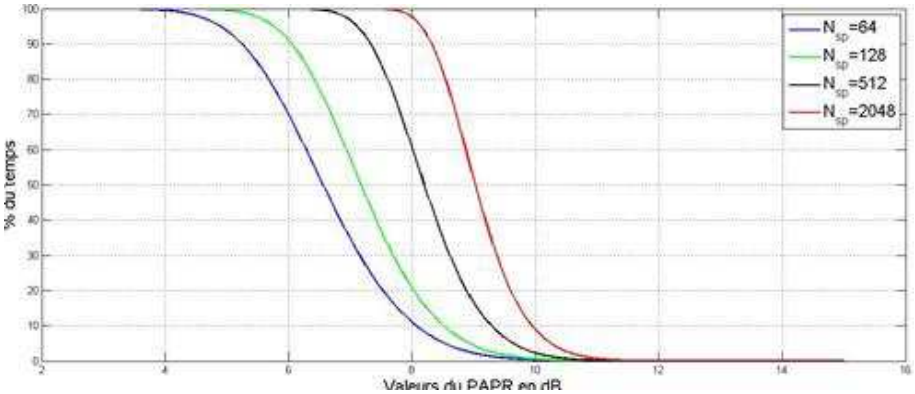


Figure 2-12 Pourcentage du temps où le PAPR est supérieur à une valeur de référence.

La figure 2-13 montre que la variation de la densité de probabilité du PAPR en fonction du type de modulation est négligeable, sa prise en compte dans le modèle n'est donc pas nécessaire.

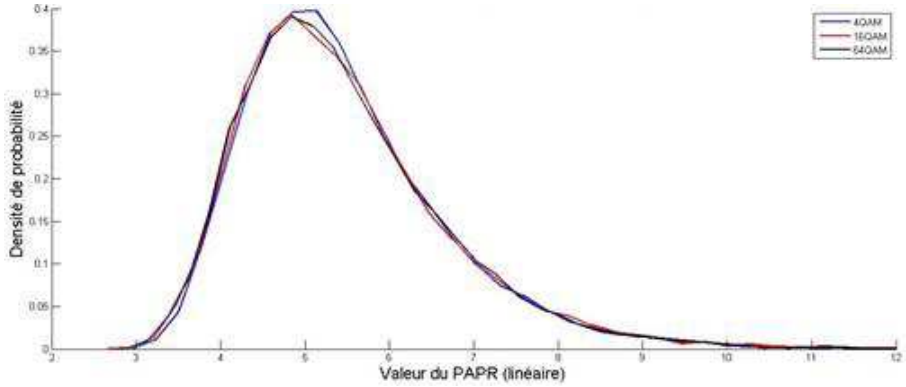


Figure 2-13 Effet de la modulation sur la densité de probabilité d'un signal OFDM.

Dans la partie précédente, nous avons vu que l'utilisation de l'ODFM favorise les fortes valeurs de PAPR et donc de variations d'enveloppe rapides et de grandes amplitudes.
Si pour le système émetteur, c'est un problème**,** il peut se résoudre par l'utilisation d'un amplificateur plus puissant qui tient compte de la valeur maximale pour rester dans la zone de fonctionnement linéaire (backOff). Par exemple pour un signal de valeur moyenne 1W et de PAPR 10dB, on prendra un amplificateur de 10W de puissance de sortie maximale.

Dans le cas d'un récepteur victime (autre système voisin), le problème est très différent, le signal brouilleur peut en effet être compatible en valeur efficace, mais non compatible en valeur de crête. Une valeur de signal brouilleur trop importante peut soit bloquer le récepteur ou créer des phénomènes non linéaires dans la chaine de réception (intermodulation, démodulation, ..) qui ne pourront plus être filtrés et peuvent potentiellement perturber la réception du signal utile (cf. fig. 2-2 et 2-3).

La suite de cette étude décrit une première approche de la généralisation de la modélisation des effets non linéaires dans les amplificateurs et des effets d'intermodulation à toute la chaine de réception [SKY12]. On ne s'est occupé, dans un premier temps, que du premier étage de systèmes radioélectriques (amplificateur en début de chaine), mais on pourra l'étendre assez facilement aussi à tout système électrique ou électronique susceptible d'être perturbé par des ondes électromagnétiques.

On se propose donc d'établir une relation simple entre le signal en entrée de la chaine de réception $s_e(t)$ et le signal en sortie de cette dernière $s_S(t)$. On appelle *A* la réponse de la chaine de réception. On a la relation suivante:

$$S_s(t) = A\big(s_e(t)\big) \tag{8}$$

où *A* est une fonction réelle impaire. Cette fonction est donc approximable par un polynôme impair de la forme:

$$P_A(s) = \sum_{q=0}^{N} a_{2q+1} s^{2q+1} \tag{9}$$

On supposera les coefficients a_i connus ainsi que le degré $2N + 1$ du polynôme approximant *A*.
En passant dans le domaine fréquentiel et en sommant les différentes contribution $S_e(f)$ d'ordre (2q+1), on obtient:

$$S_s(f) = \sum_{q=0}^{N} a_{2q+1} \big(S_e(f)\big)^{\circ 2q+1} \tag{10}$$

où $S_e(f)$ et $S_S(f)$ sont respectivement les transformées de Fourier de $s_e(t)$ et $s_S(t)$, et l'opérateur $X \rightarrow X^k$ désigne l'auto convolution d'ordre *k*. Dans le cadre des signaux utilisés en télécommunication le profil spectral $S_e(f)$ est le plus souvent de la forme:

$$S_e(f) = \frac{1}{2}\{[G_p(f - f_0) + G_p(f + f_0)] + i[G_i(f - f_0) - G_i(f + f_0)]\} \tag{11}$$

Cela provient du fait que les systèmes de transmission travaillent le plus souvent autour d'une fréquence centrale f_0, ainsi que de la décomposition de $s_e(t)$ en somme d'une fonction paire G_p et d'une fonction impaire G_i réelles. Pour un système de transmission les deux fonctions G_p et G_i sont telles que G_p=aG et G_i= bG.

Dans la suite des calculs on remplacera les termes a+ib en $Me^{i\phi}$ ou M est un réel.

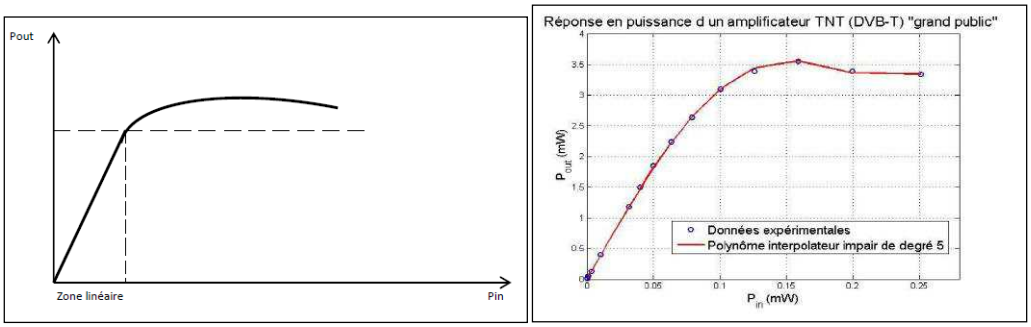


Figure 2-14 Exemple de phénomène de saturation d'un amplificateur entrainant des non-linéarités.

Pour tester la validité du modèle polynominal pour l'amplificateur non linéaire, nous avons réalisé des mesures sur plusieurs récepteurs de télévision numérique terrestre (TNT) achetés dans le commerce. Les résultats visibles sur la figure 2-14 ou les mesures (graphe de droite) collent parfaitement au modèle théorique, qui sera utilisé dans la suite des calculs.

$$S_s(f)^{\circ 2q+1} = \left(\frac{1}{2}M\right)^{2q+1} G_{2q+1}(f) * \left[\sum_{u=0}^{q}\binom{2q+1}{q-u} * \left\{e^{i(2u+1)\Phi}\delta(f-(2u+1)f_0) + e^{-i(2u+1)\Phi}\delta(f+(2u+1)f_0)\right\}\right] \quad (12)$$

$S_s(f)^{\circ 2q+1}$ représente la DSP $S_s(f)$ à l'ordre 2q + 1 et pour simplifier les écritures G_{2q+1} correspond à la fonction G d'ordre 2q+1 ($G^{\circ 2q+1}$).
On remarque que les harmoniques sont toutes impaires et que le q^{ième} coefficient du polynôme induit un facteur d'étalement du spectre de $2q + 1$, et des harmoniques dont l'ordre maximal est $2q + 1$ aussi.

En prenant l'exemple d'un amplificateur non linéaire dont la réponse est modélisable par un polynôme d'ordre impair, la densité spectrale de puissance totale (avec tous les harmonioques) pour le signal de sortie de l'amplificateur s'écrit:

$$DSP_{S_{s,u=0}}(f) = 2\sum_{q=0}^{N} a_{2q+1}^2 \left(\frac{1}{2}M\right)^{2(2q+1)} G_{2q+1}(f-f_0)^2 * \left[\binom{2q+1}{q}^2\right] \quad (13)$$

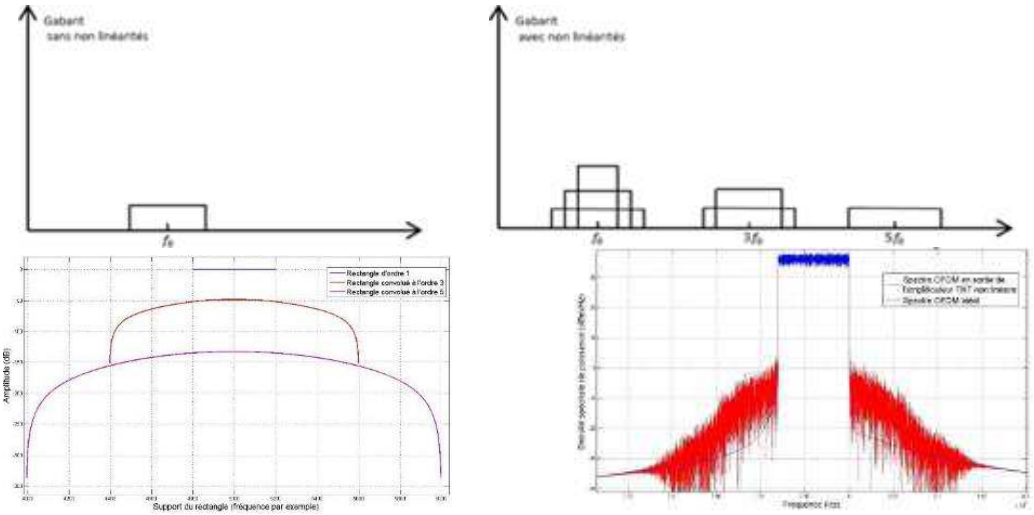


Figure 2-15 Exemple de déformations des signaux par un amplificateur non linéaire.

La figure 2-15 montre les déformations que peuvent entrainer les non-linéarités d'un amplificateur sur des signaux carrés et OFDM: apparition d'harmoniques et étalement du spectre originel. La modélisation montre que le spectre devient une somme de contributions de largeurs croissantes: 1, 3, 5, … ; visible en bas et à gauche ayant pour résultat une remontée de puissance en bande adjacente visible en bas et à droite. Les résultats obtenus sont conformes aux mesures sur des signaux réels, cette étude montre qu'il est possible de modéliser et de caractériser simplement des signaux ainsi que des chaînes de réception pouvant avoir un comportement non linéaire en présence de signaux perturbateurs à fort PAPR.
Elle a permis de mettre en avant un paramètre qui tient compte à la fois de l'amplitude du signal et de sa probabilité pouvant répondre aux nouvelles contraintes de CEM et d'exposition apportée par les systèmes de communication modernes à base d'OFDM.

Un premier rapport [SKY12]a été fourni à la société Skyguide (équivalente à la DSNA pour la Suisse), mais ce travail est toujours en cours de validation et sera proposé pour une publication.

2.3. Étude de la CRE dans deux bandes de fréquences adjacentes

Cette étude a été effectuée en partenariat avec la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA) française et l'aviation civile belge (Belgocontrol/Intersoft Electronic). Elle visait à vérifier la compatibilité radioélectrique des radars primaires et météorologiques (en réception) dans la bande de fréquence (2700-2900 MHz) avec les systèmes de

radiocommunications mobiles de nouvelle génération (4G/LTE) dans la bande de fréquence 2500-2690 MHz (cf. fig. 2.16).

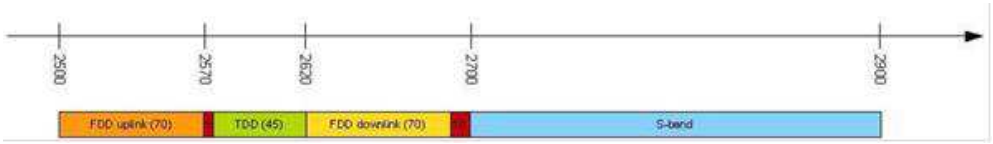


Figure 2-16 Bandes de fréquences étudiées (en Bleu la bande Radars, en orange, vert et jaune, les bandes LTE).

Pour vérifier la compatibilité entre ces systèmes, nous avons considéré principalement le brouillage éventuel issu des émissions LTE vis-à-vis des récepteurs radars situés en bande de fréquences adjacentes.

Figure 2-17 Exemples de Radars étudiés (2 radars de l'Aviation civile et un Radar météo).

Pour ce faire, nous avons réalisé une simulation des signaux LTE arrivant à l'accès d'un récepteur radar en bande S (avant le LNA aux points a et b sur la figure 2-18).

Les signaux LTE ont été synthétisés à l'aide du générateur vectoriel de signal ESG 4438c (Agilent) piloté par le logiciel Signal Studio (Agilent) permettant de paramétrer dans le détail le générateur utilisé.

Différentes valeurs de puissance et de fréquence de canal ont été testées lors des différentes manipulations pour évaluer l'impact du LTE sur la chaine de réception du radar.

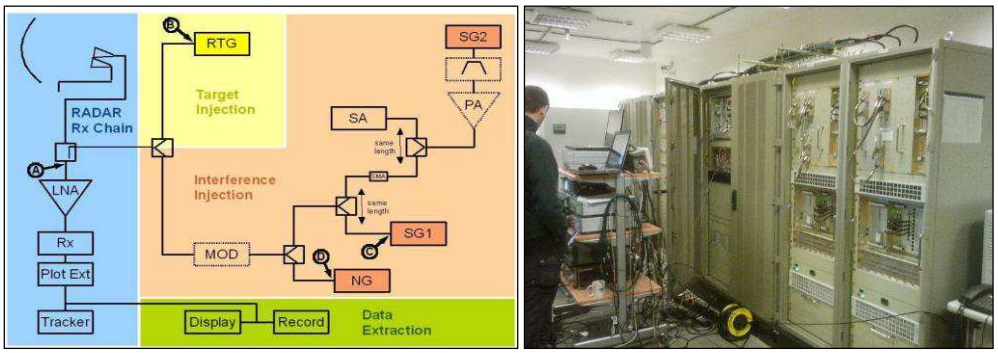


Figure 2-18 Exemple de chaine de réception typique d'un radar primaire utilisé dans l'aviation civile.

Un amplificateur a été utilisé pour élever le niveau du signal jusqu'à une vingtaine de dBm, le générateur ne pouvant fournir qu'une puissance rms maximale de 13 dBm (amplitude de sortie utilisée avant amplification de l'ordre de 0dBm garantissant une bonne linéarité du générateur).

Figure 2-19 Systèmes de mesure et de génération des brouilleurs WIMAX et LTE permettant de couvrir la bande complète en TDD et FDD.

Les paramètres généraux utilisés par Signal Studio pour la génération du signal LTE (voir Annexe LTE) lors des différents tests étaient:

- Mode de duplexage FDD (voies Downlink et Uplink sur des canaux différents),
- Seul le signal Downlink (venant d'une station de base) a été généré, avec utilisation de la technique d'accès OFDMA (OFDM Access),
- La durée de la trame utilisée était de 10ms (20 slots de 0.5ms),
- Espacement entre sous-porteuses constant = 15kHz, un "Resource Block" (RB) équivalent à un groupement de 12 SP soit: 180kHz,

- Les bandes de fréquences utilisées étaient de 5MHz (25 RB soit: 300 sous-porteuses et FFT 512) et 10MHz (50 RB soit: 600 sous-porteuses et FFT 1024),
- La modulation utilisée pour les données était de la 64QAM, modulation produisant le plus fort PAPR,
- La puissance et le canal utilisé (0dBm et 2680MHz par défaut) pouvaient être modifiés de façon « locale » sur le générateur pour la réalisation des tests.

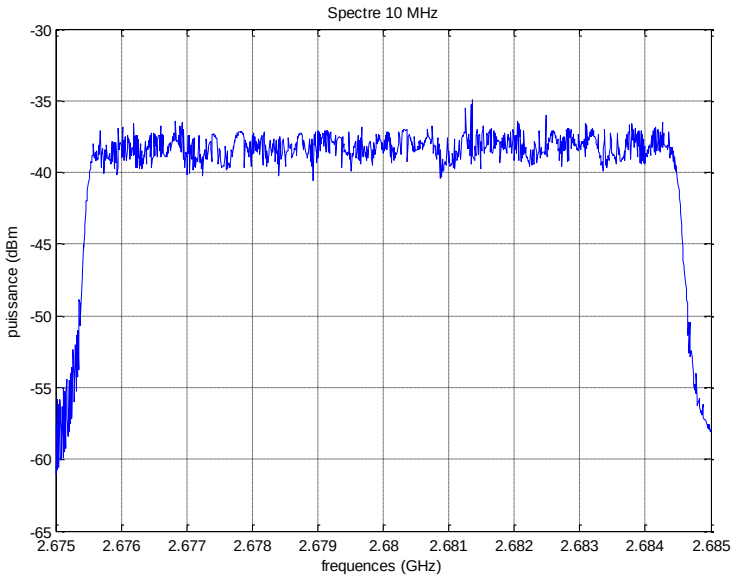


Figure 2-20 Exemple de spectre du signal LTE 10 MHz.

Test 1a: Génération d'un signal LTE FDD (trame "remplie").
Un canal de transport (de données) occupe toute la ressource de la trame (10ms). Les données sont envoyées avec une modulation de type 64QAM (en rouge sur la figure 2-21), les autres traits de couleurs correspondant aux canaux de contrôle de la trame (PBCH, PHICH, P et S Synch, sous-porteuses pilotes, …).

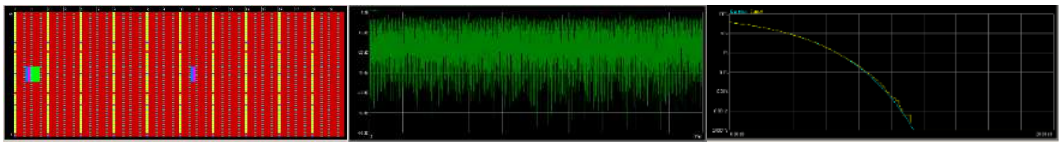


Figure 2-21 Exemple de trame LTE FDD pleine charge (copies-écran Signal Studio).

Test 1b: Idem, test 1a, mais la trame ne contient que des canaux de contrôle (trame "vide").
Aucun canal de transport (de données) n'est présent, seuls les canaux de contrôle de la trame (PBCH, PHICH, P et S Synch, sous-porteuses pilotes, …) sont émis. Le spectre émis est presque identique à celui du test 1a, mais

l'aspect temporel est très différent (variations de puissance très rapides en fonction du temps).

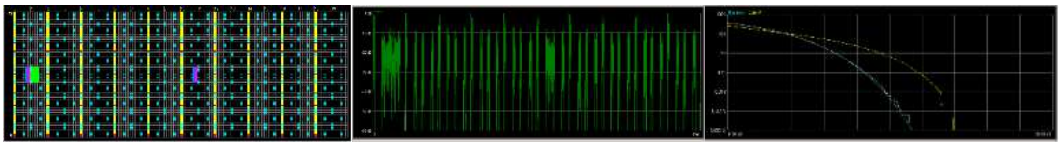


Figure 2-22 Exemple de trame LTE FDD vide (copies-écran Signal Studio).

La nouvelle courbe de CCDF obtenue (en jaune vs ancienne en gris) montre bien une plus grande variabilité de la puissance en fonction du temps. Il faut cependant bien faire attention, car pour les signaux pulsés le PAPR ou le CCDF tient compte du "Duty Cycle" en plus des effets dus à l'OFDM et à la modulation (cf. aspects temporels figure 2-22).

En conclusion, l'étude a montré que les signaux en bande adjacente de types 4G pouvaient perturber les systèmes de réception des radars d'ancienne génération et qu'il existait des solutions, pour éviter les brouillages autres que l'abaissement de la puissance ou que l'établissement d'une zone de protection de grande dimension (plusieurs dizaines de km) autour des récepteurs radar.
Une solution efficace proposée est l'ajout d'un filtre entre l'antenne et le LNA (cf. fig. 2-18).

Les tests réalisés ont permis de le dimensionner, de tester son efficacité vis-à-vis des perturbations, mais aussi de vérifier que les performances n'étaient pas trop dégradées (le filtre doit fonctionner dans les deux sens et donc supporter des niveaux de puissances très différents, de plus, il ne faut pas oublier qu'une perte d'insertion du filtre de 3dB dans la chaine de réception entraine une perte de portée de 50%).

Les principales contributions de cette étude ont été la rédaction de rapports internes destinés aux services de l'aviation civile, aux fabricants des radars. Ces rapports confidentiels ne seront pas présentés ni référencés dans ce document.

2.4. Étude de la CRE dans la même bande de fréquence

Dès 2002, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a émis le besoin d'augmenter la possibilité de communication, de gestion et de contrôle pour l'aviation civile continentale au vu des prévisions d'accroissement du trafic aéronautique.

Ce besoin de ressource doit passer par une évolution technologique significative: le passage de la bande radio VHF (Very High Frequency) analogique à des systèmes numériques, qui permettra de prendre en compte cet accroissement et d'assurer de nouveaux services avec une QoS satisfaisant les recommandations des organismes de contrôle de l'aviation civile. Cette évolution de la technologie et des usages entraine un nécessaire changement de fréquence pour le service, il a donc fallu choisir une autre plage de fréquence disponible dans les bandes réservées pour l'aviation civile. Le choix de la bande aéronautique L (960-1164MHz) s'est imposé naturellement.

Les différents articles présentés dans ce chapitre sont liés aux récentes études qui ont été réalisées dans le cadre de la thèse de Najett Neji intitulée « Compatibilité radioélectrique du futur système de communication aéronautique en bande L » (soutenue en Décembre 2011).

Depuis plusieurs années, j'ai participé à plusieurs travaux de recherche en collaboration avec la Direction Générale de l'Aviation Civile française (DGAC) et plus particulièrement avec la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA) donnant lieu à une série de rapports confidentiels pour la DSNA.

Les résultats de trois de ces études ont particulièrement servi de base à la définition de la ligne directrice de la thèse, à mieux comprendre le contexte et les enjeux (attentes et contraintes particulières liées à la sécurité des personnes) du monde très particulier de l'aviation civile.

2.4.1 "Évaluation des brouillages potentiels dans la bande L (960-1215 MHz) par le système militaire de télécommunications tactiques JTIDS/MIDS".

L'aéronautique civile est l'opérateur primaire de la bande de fréquences réglementaire UHF 960-1215 MHz (dite Bande L). Cette bande est utilisée par différents systèmes permettant à des avions de se repérer, de se déplacer et de partager l'espace aérien en toute sécurité (cf. fig. 2.23), mais aussi par le Ministère de la Défense qui est un opérateur secondaire de cette bande de fréquence. Il utilise cette bande pour un système de télécommunication tactique interarmées utilisé par l'OTAN nommé JTIDS/MIDS (Joint Tactical Information Data System/Multi-functional Information Distribution System) [MIT00, MIN03].
Les documents de références décrivant les paramètres utilisés par les systèmes avioniques présents dans la bande L qui ont été utilisés sont: [ICA96, EUR00, FCC02, ICA03, ICA09, EUR10].

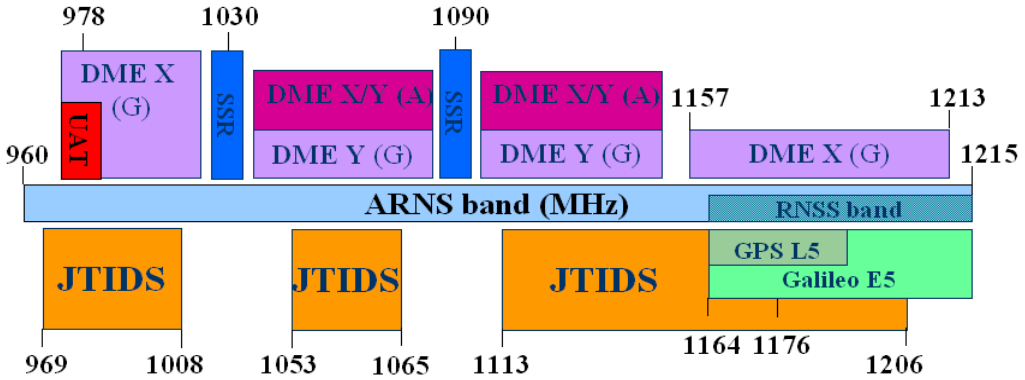


Figure 2-23 Utilisation de la bande aéronautique L avant l'introduction du futur système LDACS.

- DME (Distance Measuring Equipment): système de mesure à distance pour la radionavigation, entre un aéronef équipé d'un interrogateur et un transpondeur au sol [KEL63, DOD80, KEL84, EUR87a, EUR87b].
- SSR (Secondary Surveillance RADAR): le radar secondaire est un dispositif sol de contrôle aérien qui interroge les aéronefs dans le but de recueillir des informations. Il permet de déterminer la position de l'avion à l'aide d'un gisement et d'une distance relatifs à l'antenne. Il nécessite un transpondeur à bord. Les transpondeurs du système SSR sont également utilisés par le système anticollision ACAS [EUR03, ICA02].
- UAT (Universal Access Transceiver): est un système de liaison de données entre les aéronefs et le sol à des fins de surveillance, de contrôle du trafic aérien et de services divers. Il a été initialement développé afin de fournir des services de surveillance automatique des aéronefs du type ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) [ICA05b, ICA05c].
- TACAN (TACtical Air Navigation): désigne un système de navigation aérienne militaire.
- RNSS (Radio Navigation Satellite Service), GPS L5 (Global Positionning System bande L5) et Galileo: Systèmes de positionnement par satellites [BAS04].

Dans cette étude, on a plus particulièrement étudié la compatibilité radioélectrique entre le système JTIDS et le système DME pour qui est potentiellement le plus affecté par cette cohabitation par le partage de la même bande de fréquence (co-fréquence). La première étape a consisté à caractériser dans le domaine temporel et fréquentiel un signal de type DME dans ces différents modes de fonctionnement ainsi qu'un signal JTIDS pour différentes valeurs de charge puis de modéliser un récepteur DME victime générique.

Dans un deuxième temps une étude théorique validée par des simulations utilisant une approche temporelle basée sur l'aspect dynamique des signaux montre que la coexistence était possible du fait de la robustesse du DME.

Une consolidation expérimentale a été réalisée en collaboration avec le Service Technique de la Navigation Aérienne de Toulouse (STNA) qui disposait du banc matériel avionique adéquat (balise et interrogateur DME), Supélec apportant son simulateur de signal JTIDS (cf. fig. 2.21).

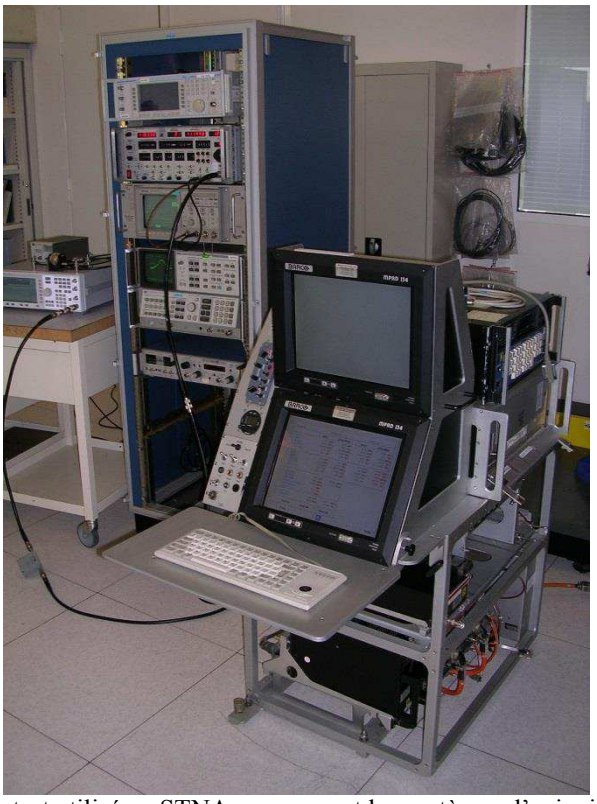


Figure 2-24 Banc de test utilisé au STNA comprenant les systèmes d'avionique et le générateur JTIDS/MIDS.

2.4.2 "Étude de la compatibilité électromagnétique d'un futur système de communication aéronautique vis-à-vis des systèmes existants embarqués opérant dans la bande L (960-1215 MHz) ".

La communauté de l'aviation civile étudie actuellement la possibilité d'établir des radiocommunications air-sol dans les bandes de fréquence dont l'usage était jusqu'ici réservé aux moyens de radionavigation aéronautique. Une des premières phases de cette étude était de faire adopter par la Conférence Mondiale de Radiocommunications (CMR) l'évolution du règlement des radiocommunications ouvrant ces bandes de fréquence au service mobile aéronautique en route, c'est-à-dire aux communications aéronautiques réservées à la sécurité et la régulation des vols.

Pour ce faire, il était nécessaire que le nouveau système envisagé: le Futur Système de Communication (FCS pour "Future Communication System"), soit compatible avec les services radioélectriques et systèmes existants déjà dans la bande de fréquences.

Le problème de compatibilité électromagnétique à bord d'un aéronef vient essentiellement du fait que les avions possèdent un nombre important d'antennes (souvent positionnées en situation de vis-à-vis) pour des systèmes opérant dans la même bande de fréquences. Aussi, chaque équipement à bord doit satisfaire à une double obligation de compatibilité électromagnétique:

- Être capable de fonctionner nominalement en présence de toute interférence en provenance de l'ensemble des autres systèmes dans une même bande,
- Limiter ses propres rayonnements hors bande et non essentiels susceptibles de tomber dans la bande passante des équipements déjà existants (« les victimes ») avec des niveaux bien en dessous de seuils préétablis de brouillage préjudiciable pour chacune de ses victimes.

Le travail que l'on a réalisé dans cette étude de faisabilité (l'ajout d'un FCS en bande L) a consisté à l'analyse de la compatibilité du FCS dans la bande 960-1213 MHz avec les principaux équipements émettant dans la même bande c'est-à-dire le DME, le SSR et l'UAT.
Pour réaliser l'étude de compatibilité électromagnétique entre systèmes radio dans la bande L'on s'est basé sur les documents suivants [CEP02, CEP05, ICA05a, ITU05a, ITU05b, ITU08a, MIC09] on doit considérer différents cas de brouillages.

Caractéristiques des sources potentielles de brouillages:
- Leur localisation,
- Les caractéristiques des antennes,
- La puissance transmise,
- La fréquence concernée,
- La forme d'onde.

Caractéristiques des récepteurs victimes:
- La sensibilité du récepteur victime,
- La distance entre le brouilleur et l'antenne victime.

On peut ainsi entrevoir différents cas d'étude de compatibilité électromagnétique:

Compatibilité au niveau de l'avion (compatibilité co-site): les transmissions du FCS seront perçues comme néfastes par les différents récepteurs à bord du

même avion: c'est l'étude de compatibilité prépondérante étant donnée la proximité des équipements à bord.
Compatibilité air-sol: les transmissions venant d'un avion seront toutes perçues par les stations au sol des différents équipements.
Compatibilité sol-sol: elle concerne la compatibilité des transmissions des stations au sol du FCS par rapport à celles des stations au sol du DME, UAT et SSR.
Compatibilité sol-air: les transmissions des stations au sol du FCS seront ressenties par les récepteurs à bord du DME, SSR, et UAT.
Compatibilité air-air: les transmissions FCS d'un avion seront ressenties au niveau du récepteur DME, SSR et UAT d'avions voisins.

Dans cette étude, on s'est focalisé sur les deux types de brouillages les plus perturbants dans le cas co-site (les systèmes brouilleur et victime sont localisés sur le même avion): le brouillage co-canal ou un signal brouilleur de faible niveau, mais de fréquence proche de celle utilisée par le récepteur victime et le blocage par désensibilisation qui peut arriver avec un brouilleur de forte puissance situé en bande adjacente.

Lors de cette étude préliminaire (le système FCS n'étant pas encore défini à l'époque), des choix techniques ont été pris quant à l'éventuelle architecture du FCS. Les tests ont été réalisés avec les techniques TDMA et TDD comme accès multiple et mode de duplexage. La bande de fréquence utilisée pour les émissions a été restreinte à la bande 960 – 977 MHz, qui présente l'avantage de n'être pas encore utilisée.

Le bilan de liaison effectué à bord d'un aéronef, pour le FCS, doit répondre aux cahiers des charges du futur système tel que défini dans l'annexe 10 de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). La FAA (Federal Aviation Administration: administration de l'aviation civile aux États-Unis) et le COCR (Communications Operating Concepts and Requirements) d'Eurocontrol (organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne) ont permis d'établir les niveaux de puissance nécessaires au bon fonctionnement du système FCS, pour avoir la portée désirée, tout en limitant les émissions néfastes pour les autres équipements.

Les résultats de cette étude de compatibilité dans le domaine temporel montrent que:

- Le FCS (tel que défini plus avant) génère peu de brouillages au niveau des systèmes existants à bord d'un aéronef,
- Le DME et le SSR semblent pouvoir fonctionner sans aucun problème: leurs signaux sont très rarement émis en même temps qu'un signal FCS.

De plus, le large écart fréquentiel entre la bande du FCS et celles du DME et du SSR assure une sécurité supplémentaire au niveau de leur fonctionnement. Par contre, cette protection supplémentaire est d'une efficacité moindre pour

l'UAT, dont la fréquence d'utilisation est adjacente du FCS avec des caractéristiques temporelles qui en font un équipement plus sensible aux incompatibilités avec les signaux du FCS. Néanmoins, l'UAT semble pouvoir conserver un fonctionnement quasi normal, car les situations d'interférences avec les signaux FCS sont très rares.

Les constats sont les mêmes concernant le fonctionnement du FCS lui-même. Le DME et le SSR ne le perturbent quasiment pas, alors que l'UAT serait une source non négligeable de brouillages.
Ainsi, des techniques de correction d'erreurs permettraient aisément de pallier aux erreurs de transmission des bursts FCS dues à la présence de signaux DME et SSR. Par contre, l'impact des signaux UAT serait trop important pour pouvoir envisager une correction d'erreurs. Étant données les faibles probabilités de brouillages UAT/ FCS, une stratégie de répétition de burst serait plus appropriée pour garantir le fonctionnement du FCS.

2.4.3 « Étude d'un Futur Système de Communications pour l'aéronautique dans la bande L »

Le but de cette étude était d'identifier quelles étaient les meilleures technologies parmi toutes celles candidates pouvant répondre au FCS tel que défini par le COCR (critères d'évaluation définis par la NASA, ITT, FAA et Eurocontrol) et qui auraient un impact réduit en terme de CEM avec les systèmes existant.
Les document de références utilisés pour la définition du FCS sont [EUR04, EUR05, NAS05a, NAS05b, EUR06, EUR07a EUR07b, EUR07c, ITU07c, GIL08].

Deux aspects sont décrits dans le document COCR.

a) La prise en compte des services que doit rendre le FCS en fonction des situations de vol liées aux problématiques AOC (Air Operator Communication) et ATC (Air Traffic Control) de l'ATM (Air Traffic Management). Les principaux services sont: les contacts voix et les autorisations diverses, la gestion dynamique des trajectoires (changement initié par l'équipage ou le contrôleur, les changements de trajectoire automatique, la vérification des paramètres…), la transmission d'informations (météorologiques, de guidage, procédure aéroportuaire…), les services d'urgence (contact d'urgence, alerte), l'état de l'appareil (moteur, fuel, position, log de vol), la mise à jour des logiciels et la gestion de la communication (initialisation, maintien, terminaison).

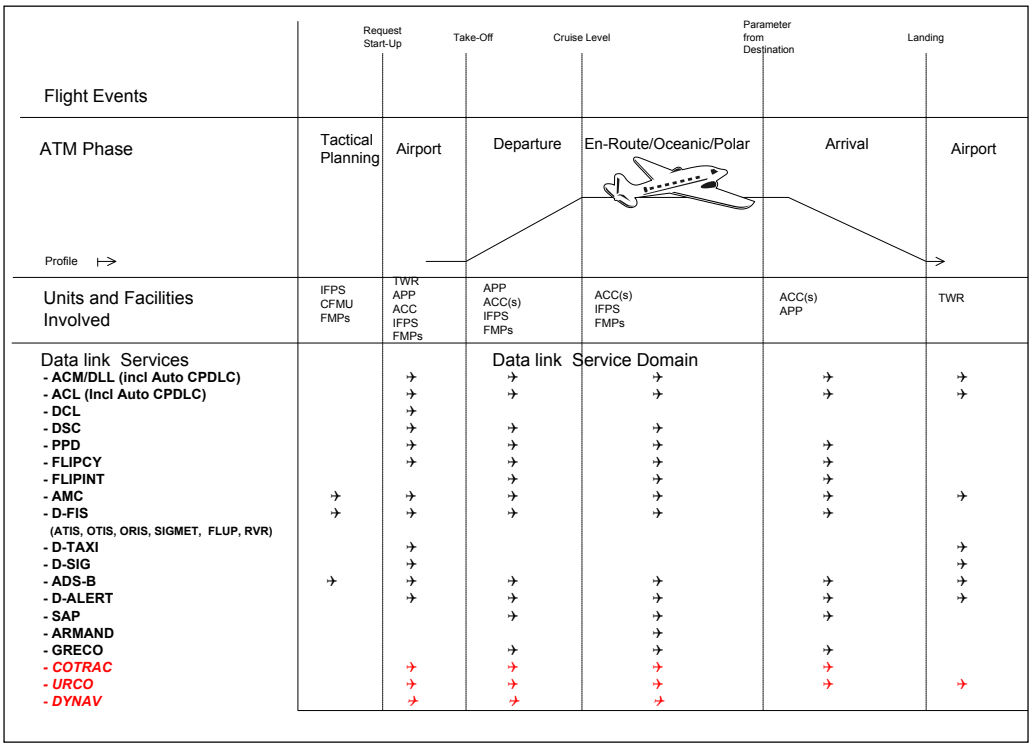


Figure 2-25 Exemple de répartition des besoins en communications lors du déroulement du vol.

Le FCS devra offrir un grand nombre de fonctionnalités de haut niveau, il convient donc de choisir un système de tramage qui soit, au niveau physique, le plus neutre possible. La gestion des priorités sera faite suivant la classification de la QoS suivante:

- service "urgence": ordre (ou voix) avec un temps de transaction de l'ordre de la seconde,
- service "tactique": instruction immédiate au pilote, ordre avec un temps de transaction de l'ordre de la seconde,
- service "stratégique": instruction au pilote (par exemple: changement de trajectoire), ordre avec un temps de transaction de l'ordre de la dizaine de secondes,
- service "base de données": interrogation d'une base de données (par exemple: téléchargement de la carte d'un aéroport) avec un temps de transaction de l'ordre de la minute.

b) Les contraintes et exigences techniques définies pour le FCS:

- Le système ne doit jamais laisser un avion sans prise en charge. La disponibilité devra donc être de l'ordre 99,999%,
- En fonction de la localisation de l'avion, le temps d'accès devra être de 2 à quelques secondes,
- Au niveau de l'intégrité du système, le taux d'erreur devra se situer entre 10^{-7} et 10^{-8},

- Temps de transfert de données réduit: le système devra être capable de transmettre des paquets de quelques centaines de kbit, en un temps variant de 2 à 30 secondes.

Actuellement, l'espace dans lequel l'avion évolue est divisé en plusieurs secteurs, et l'avion est sous la responsabilité d'un contrôleur. Lorsque l'avion change de secteur, il change de contrôleur, l'objectif du FCS est d'automatiser ce processus, tout en réservant la supervision aux contrôleurs.

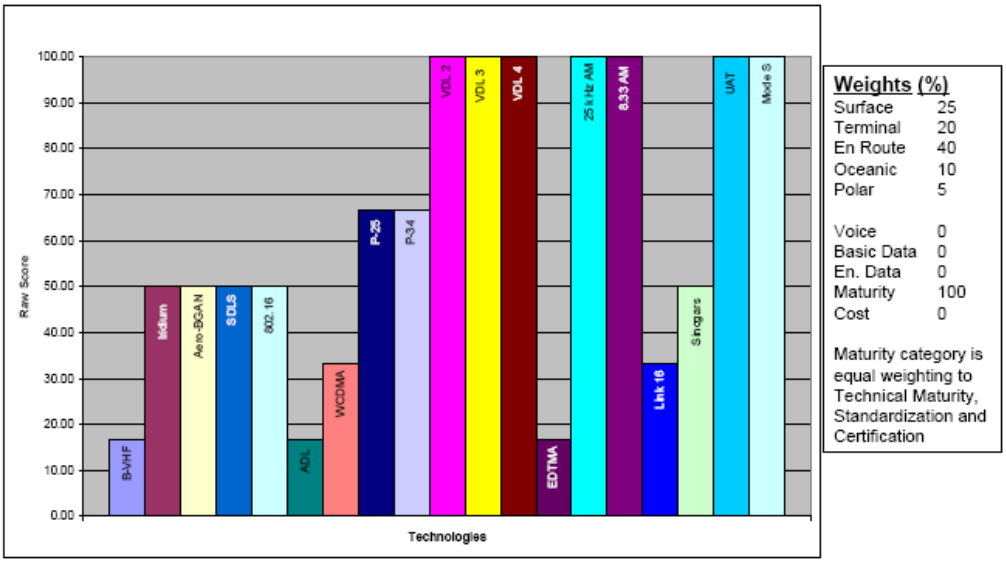


Figure 2-26 Exemple de résultats aux tests comparatifs des technologies candidates.

Parmi toutes les technologies, trois de ces technologies ont été présélectionnées:

- Le B-VHF (Broadband VHF) qui est un système permettant de transmettre de la voix et des données d'un avion au sol et entre avions. Ce système est basé sur une technologie MC-CDMA (multi carrier code division multiple access), qui dérive de la technologie OFDM.
- Le VDL mode 3 (VHF Data Link mode 3) qui est un système de communication air-sol fondé sur la technologie TDMA (time division multiple access), permettant de transmettre, dans une même bande de fréquence, des données et de la voix,
- Le P 34 qui est un système de transmission large bande de paquets de données par IP sur des canaux de 50, 100, 150 kHz dans la bande 700 MHz. C'est donc au départ un système de transmission de données, mais en codant la voix (VoIP), on peut aussi transmettre des messages vocaux.

Ces technologies ont été testées pour les problèmes de CEM avec les systèmes DME, UAT et SSR grâce à des simulations effectuées à l'aide du logiciel SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool)

très utilisé dans le domaine de la compatibilité radioélectrique (recommandé par la CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations). Les résultats des simulations conduites lors de cette étude montrent qu'aucun système ne l'emporte, chacun ayant ses propres spécificités.

Ces trois systèmes ne pourront pas répondre seuls aux exigences du COCR, et il sera sans doute nécessaire de recourir à un système complémentaire, comme par exemple, un système par satellite pour couvrir les pôles.

2.4.4 Travaux réalisés dans le cadre de la thèse « Compatibilité radioélectrique du futur système de communication aéronautique en bande L »

Avec l'explosion des systèmes sans fil, les problèmes de coexistence ou de compatibilité radioélectrique augmentent. Il y a de plus en plus de systèmes qui partagent, ou vont devoir partager, une bande de fréquence (peu de bandes libres) ou un même espace (cohabitation sur un même équipement). Dans les deux articles suivants [LET11a, LET11e] nous avons étudié la compatibilité entre deux systèmes radio génériques dans un environnement simple: bande de fréquence partagée de type ISM et espace libre.

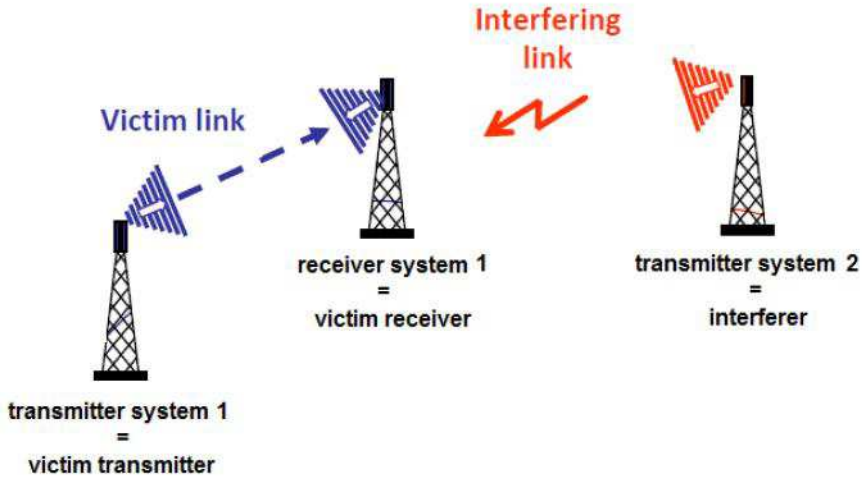


Figure 2-27 Modèle classique de la CRE avec les émetteurs brouilleur et utile et le récepteur victime.

Les résultats montrent que l'approche classique de l'analyse de CRE dans le domaine fréquentiel n'est plus adaptée pour les nouvelles formes d'ondes émises par les systèmes de communications modernes. Nous y proposons une autre approche pour l'évaluation de la CRE qui prend en compte la dimension temporelle, l'occupation du canal et les variations rapides de puissance des signaux à base d'OFDM ou "pulsés".

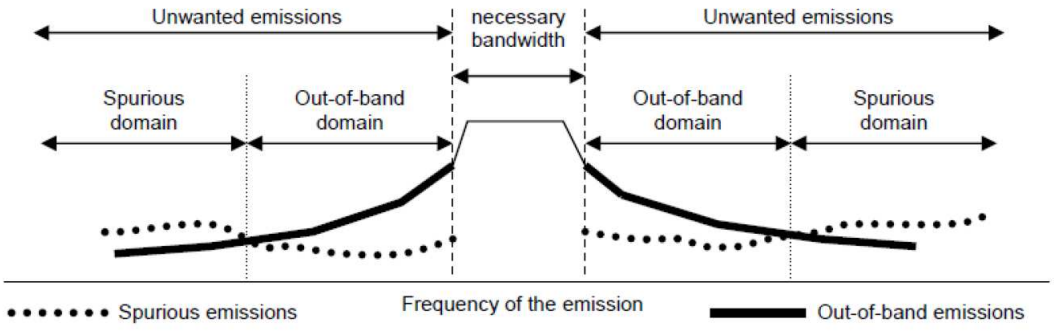


Figure 2-28 Les différentes classifications des bandes de fréquences.

Cette prise en compte des variations de puissances va permettre un meilleur partage de la ressource spectrale pour des systèmes à faible taux d'émission / rapport cyclique (Duty-Cycle) et une meilleure compréhension des problèmes liés à la forte dynamique des nouvelles technologies numériques.

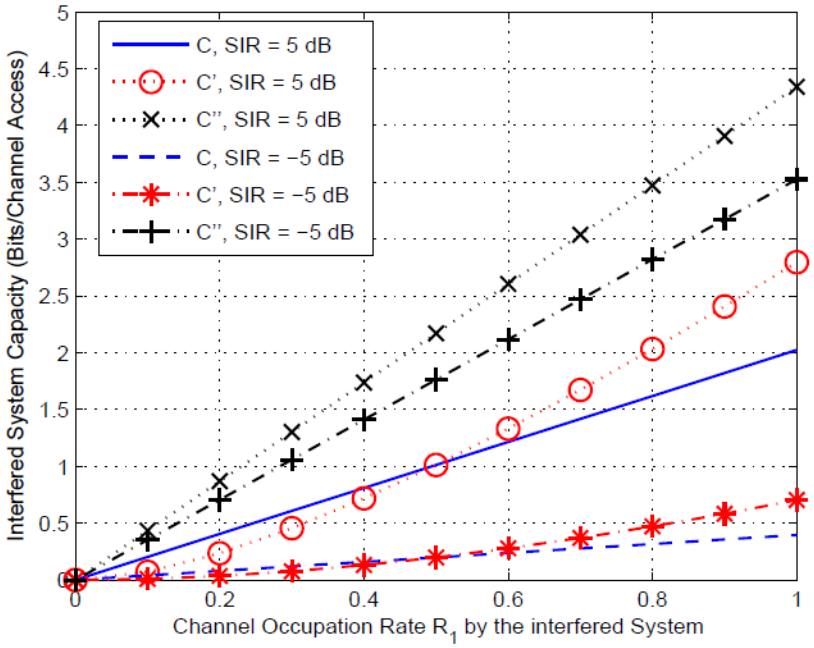


Figure 2-29 Influence du taux d'occupation du canal du brouilleur sur la QoS du système victime.

Dès 2002 l'International Civil Aviation Organization (ICAO) a émis le besoin d'augmenter la possibilité de communication, de gestion et de contrôle pour l'aviation civile continentale au vu des prévisions d'accroissement du trafic aéronautique. Ce besoin de ressource doit passer par un changement technologique: le passage de la VHF analogique à des systèmes numériques, qui permettra de prendre en compte cet accroissement et d'assurer de nouveaux services avec une QoS satisfaisant les recommandations des organismes de contrôle de l'aviation civile. Le papier de synthèse et de recensement des technologies [LET12] présente un état des lieux des systèmes actuels présents

dans la bande aéronautique L (960-1164MHz), l'estimation des besoins futurs de communication des services aéronautique due à l'accroissement du trafic aéronautique civil mondial. Il présente aussi les deux technologies candidates (retenues) qui répondent au cahier des charges proposé par l'ICAO prenant en compte les recommandations et les attentes par rapport au futur système L-DACS (L-band Digital Aeronautical Communication System). Ces deux nouvelles technologies concurrentes (basée sur des évolutions technologiques récentes), qui ont été validées lors d'une première phase de sélection: L-DACS-1 et L-DACS-2, doivent encore passer les tests de CEM/CRE avec tous les systèmes déjà présents dans la bande.

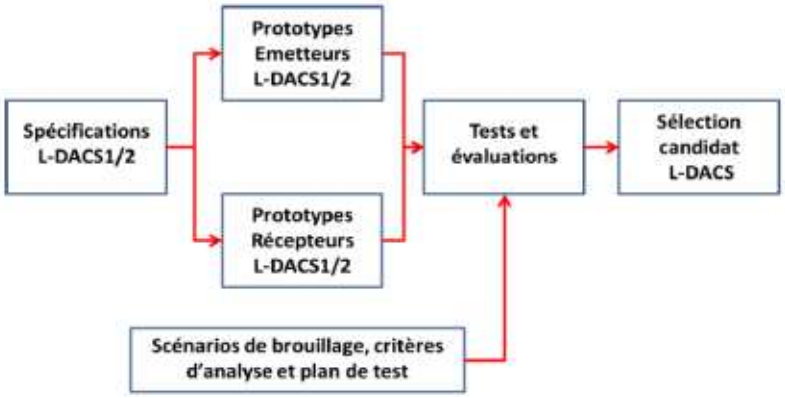


Figure 2-30. Déroulement des différents tests de CRE.

Pour réaliser les études de CRE complémentaires, il a fallu prendre en compte les spécificités de l'environnement aéronautique et donc la dimension spatiale en 3 trois dimensions. Le récepteur victime et l'émetteur brouilleur peuvent être sur un même avion (scénarii co-site, avec de très courtes distances) ou sur des avions proches (scénarii air-air, avec des distances de séparation aéronautique).
Les documents ayant servis de référence pour la définition du système L-DACS-2 sont: [EUR09a, EUR09b, ITU09].

Paramètres	***L-DACS1***	***L-DACS2***
Modulation	OFDM/QPSK	GMSK
Portée	200 NM	200 NM
Largeur de bande	498,05 *kHz*	200 *kHz*
Puissance d'émission au sol	16 *dBW*	25,4 *dBW*
Puissance d'émission à bord	16 *dBW*	17 *dBW*
Gain maximal d'antenne au sol	8 *dBi*	8 *dBi*
Gain maximal d'antenne à bord	5,4 *dBi*	5,4 *dBi*
Facteur de bruit du récepteur au sol	5 *dB*	7 *dB*
Facteur de bruit du récepteur à bord	6 *dB*	10 *dB*

Figure 2-31 Principaux paramètres des 2 technologies candidates.

La première phase a été de rechercher tous les scénarii possibles pour la coexistence des différentes technologies et de trouver le scénario le plus critique en termes de CEM prenant en compte les spécificités de l'environnement aéronautique, intégrant la dimension spatiale en 3d. Le récepteur victime et l'émetteur brouilleur peuvent être sur un même avion ou sur des avions proches cf. fig. 2-32).

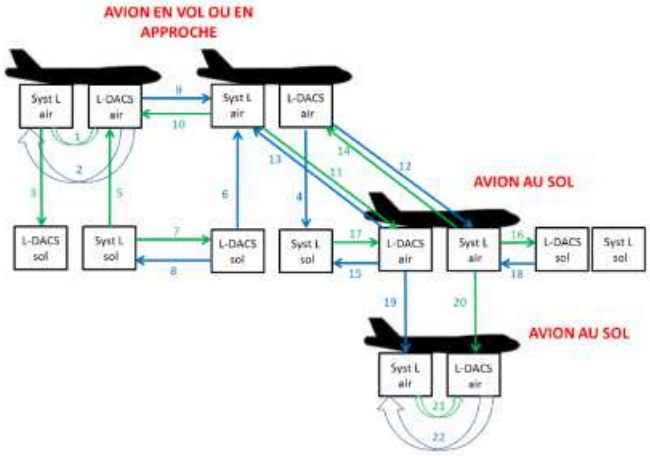


Figure 2-32 les différents scénarii possibles pour les tests de CRE.

Plusieurs simulations ont donc été réalisées en utilisant des techniques classiques fréquentielles (émission continue) où les brouilleurs étaient représentés par leurs masques ou gabarits d'émission (cf. fig. 2-33) et la victime était un récepteur générique parfait ayant une bande utile de 1 MHz.

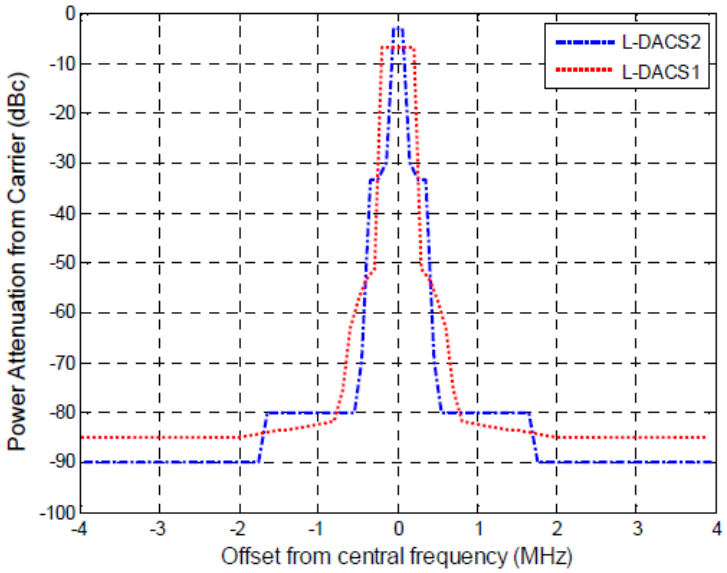


Figure 2-33 Masques d'émission des 2 systèmes LDACS.

Seule la puissance émise par les trente avions les plus proches a été prise en compte parmi la centaine de ceux présents dans une zone de contrôle aéronautique. Les diagrammes des antennes, d'émission et de réception, utilisées par ces systèmes ont également été pris en compte. Le scénario posant donc potentiellement plus de problème est le cas co-site: cas où les deux émetteurs/récepteurs (brouilleur et victime) ce trouvent sur le même avion (en vol ou au sol) et travaillent sur une même bande de fréquence: cas co-fréquence.

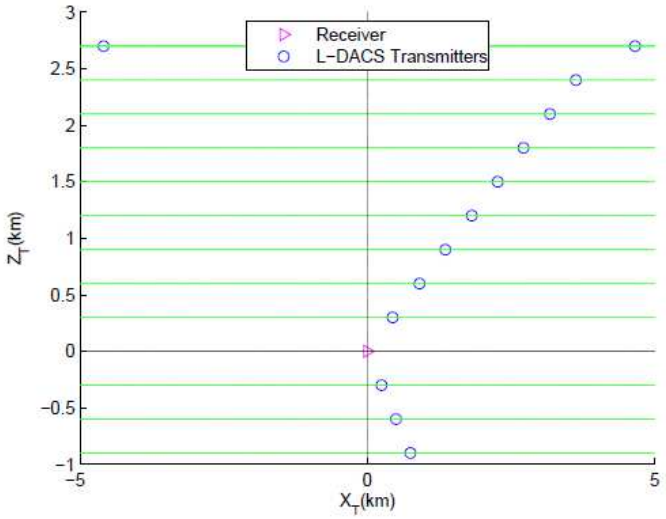


Figure 2-34 Séparations aéronautiques utilisées lors des simulations (modèle 2D).

Le cas critique, validé par la DSNA, qui a été choisi et étudié pour la suite des études de CRE est celui du L-DACS-2 vs DME. Le DME parce qu'il est le système victime, à bord, le plus critique du fait de son mode de fonctionnement, de sa sensibilité et de la proximité de sa bande utile. Le L-DACS-2 parce que d'autres équipes de recherche en Europe se focalisent sur le système L-DACS-1. Les résultats montrent que le brouillage généré, en termes de rapport signal à bruit (Signal to Noise Interferrence Ratio ou SINR), provient principalement de l'avion le plus proche quel que soit le système L-DACS utilisé. Les articles [LET09b, LET09h] résument les résultats de ces travaux.

Cette première phase ne nous a donc pas permis de différencier les deux technologies candidates, il faut donc maintenant étudier pour le pire cas l'impact réel des technologies en prenant en compte leurs spécificités temporelles [technique d'accès, modulations, taux d'activité ou duty cycle (DC)]. Pour ce faire, un banc de test a été développé pour la réalisation de mesures en complément des simulations (cf. fig. 2-35).

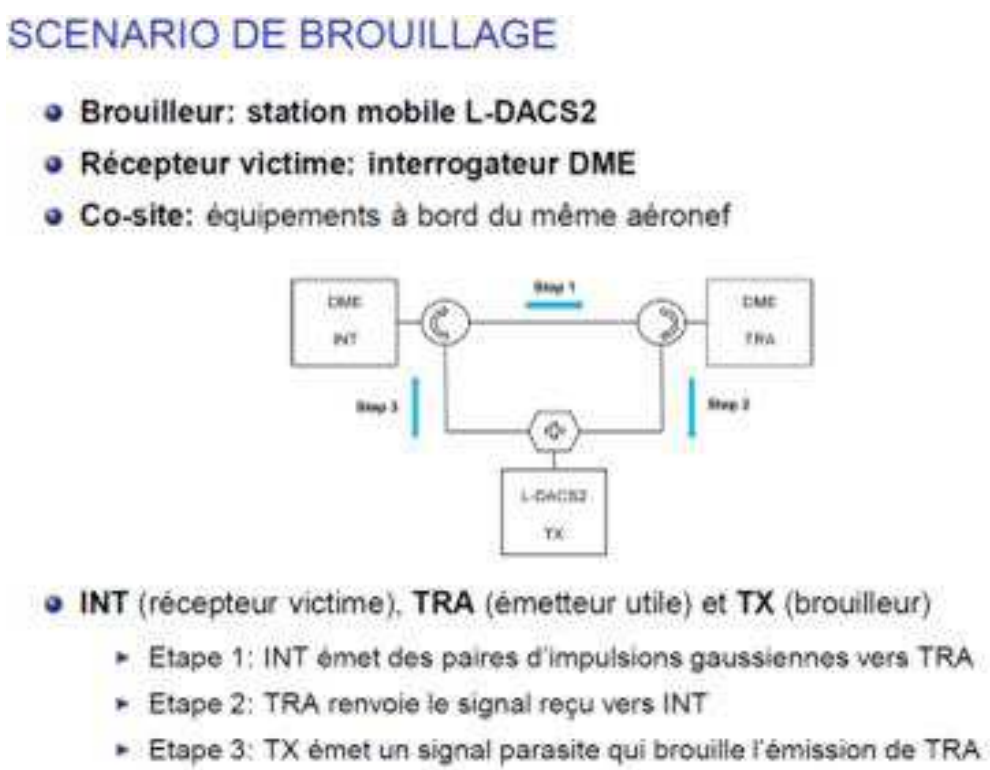


Figure 2-35 Description du banc test et exemple de tests réalisés.

Dans un premier temps une étude théorique temps/fréquences, sous Matlab, a été faite permettant de valider la possible coexistence des deux systèmes. Le signal victime (DME) a été modélisé assez simplement du fait du manque d'informations sur les technologies embarquées dans les récepteurs, puis différentes formes d'onde du système brouilleur L-DACS-2 (cf. fig. 2-36) correspondants à plusieurs scénarii différents: choix de plusieurs longueurs de trames data, pour faire varier la valeur du duty cycle et plusieurs niveaux de puissance, pour faire varier la valeur du rapport de la puissance du signal sur les interférences (SIR pour Signal Interference Ratio). Les résultats montrant que la coexistence étant possible, sous certaines conditions, un système expérimental et un protocole de test robuste ont été élaborés pour vérifier le comportement réel de matériel embarqué.

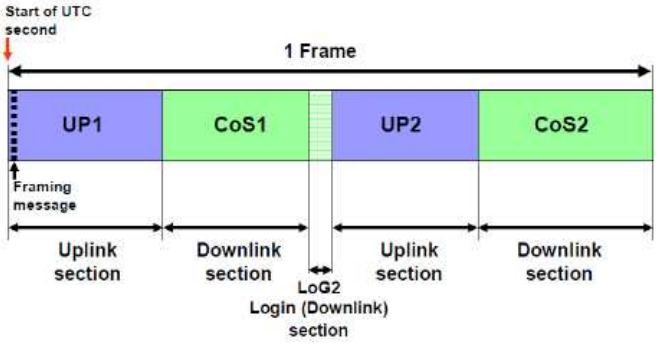


Figure 2-36 Organisation temporelle des trames L-DACS-2.

Le premier montage réalisé, en mode dit conduit (cf. fig. 2-35), a dû être abandonné, car des effets non linéaires non désirés sont apparus au niveau de certains éléments du montage (circulateurs, coupleurs) du fait de la grande dynamique de variation d'amplitude des signaux DME (cf. fig. 2.37) bien que la valeur crête ne dépassant pas les recommandations "maximale constructeur". Comme pour tous les équipements, ces caractéristiques constructeur sont établies par des tests en CW, soit en régime établi et non pas avec des signaux pulsés, c'est-à-dire en mode impulsionnel.

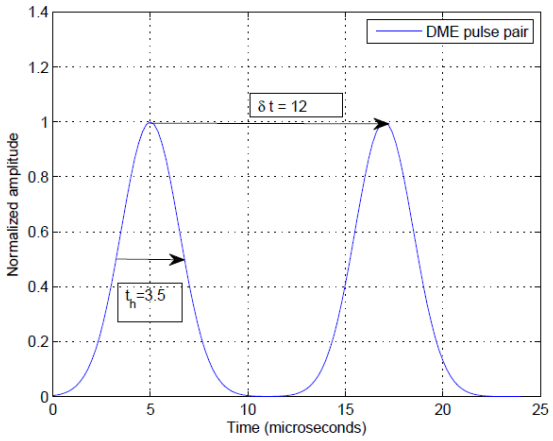


Figure 2-37 Forme temporelle d'une paire d'impulsions DME.

Un autre banc test a donc été monté, en mode rayonné, dans une chambre anéchoïque (cf. fig. 2-38). Les résultats obtenus confirment les résultats des simulations, mais montrent des impacts moins importants que prévu par la simulation confirmant l'importance de la prise en compte de la forme d'onde et de l'implémentation réelle du récepteur par le fabricant (existence de marges par rapport au minimum imposé par les normes).

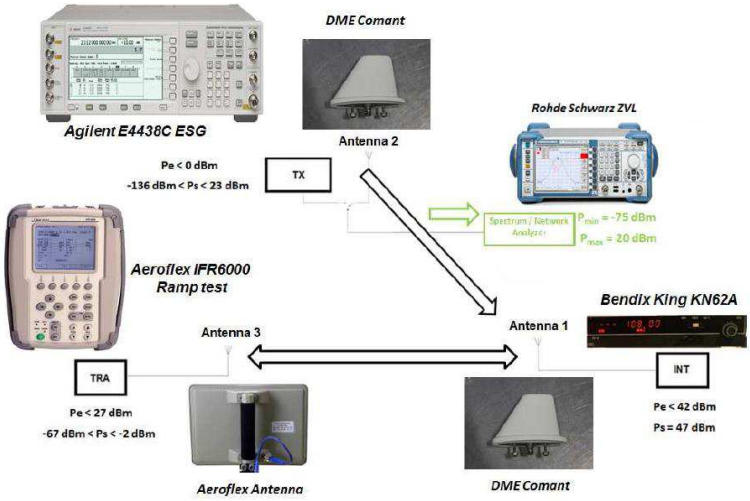


Figure 2-38 Montage en mode rayonné utilisé pour les essais de CRE (en chambre anéchoïque).

La figure 2-39 montre que la compatibilité n'est plus maintenue si le taux d'occupation du canal par le système L-DACS-2 passe au-delà de 20%. Pour l'instant la valeur du taux d'occupation maximal pour le système ne dépasse pas 10% ce qui permet donc aux systèmes DME de fonctionner avec des taux de réponses aux interrogations de plus de 60%. Et si dans l'avenir les besoins en ressources pour le L-DACS-2 augmentent au-delà de 20%, il est toujours possible d'utiliser une séparation fréquentielle supérieure pour réduire son influence. Les résultats sont présentés dans les articles [LET10a, LET10b].

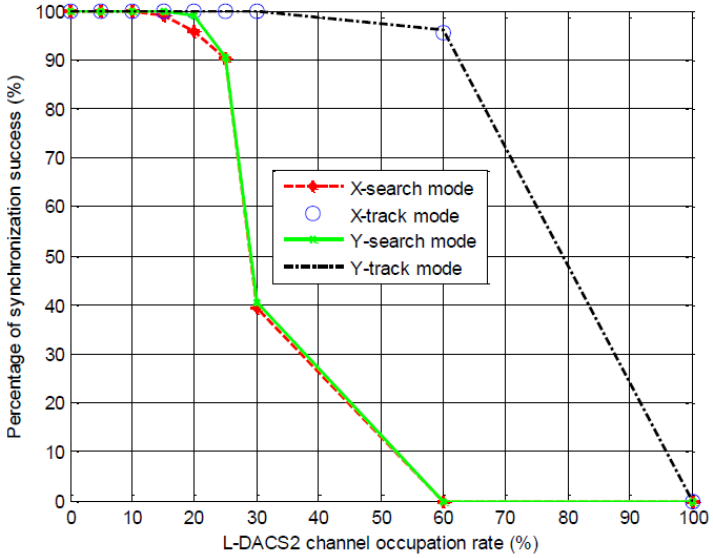


Figure 2-39 Pourcentage de synchronisation du récepteur DME vs taux d'occupation du canal (Duty Cycle).

L'article [LET13a] explique en détail le protocole utilisé et résume le travail effectué. Il montre quel pourrait être l'impact de l'ajout d'un nouveau système de communication: le L-DACS-2 sur un système de positionnement des avions: le DME.

Modulation	SIR = 0	SIR = -20	SIR = -50	SIR = -80
BPSK	73	70	67	66
QPSK	71	66	66	66
8-PSK	71	68	68	69
8-QAM	75	75	75	74
16-PSK	77	75	75	75
16-QAM	75	76	76	77
64-QAM	76	75	76	76
MSK	75	73	73	73
GMSK	78	77	76	76

Figure 2-40 Effet de la modulation sur le fonctionnement du système DME (SIR exprimé en dB).

La figure 2-40 montre qu'à taux d'occupation égale, la modulation utilisée par le système n'a que peu d'impact sur le temps de synchronisation du DME.

2.4.5 Conclusions

La bande aéronautique 960-1164MHz (Bande L) est actuellement utilisée par plusieurs systèmes radio critiques liés au positionnement ou à la sécurité aérienne. Ces différentes études montrent comment deux systèmes radio travaillant dans une même bande de fréquence et sur un même site (un avion) peuvent coexister sans se perturber. Les résultats obtenus sont encourageants, ils seront bien sûr à comparer avec les résultats des études mettant en œuvre le LDACS-1, mais aussi à prendre en compte les autres systèmes utilisant cette bande.
Cette étude a aussi débouché sur plusieurs contributions faites par la DGAC pour la France à l'IUT-R (Union Internationale des Télécommunications – Radiocommunications ; anciennement CCIR) et à la CMR 2012 (Conférence Mondiale des Radiocommunications de 2012).

Chapitre 3
Domaine de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques (1ère partie)

Dans le chapitre précédent, nous avons vu les problèmes que peuvent poser les nouvelles technologies sur les matériels et les systèmes de réception. Dans ce troisième chapitre deux études dédié à l'exposimétrie due à des signaux connus et émettant de façon intentionnelle, vont être abordées. La première qui va montrer que la forme d'onde d'un signal RF a un impact important sur la mesure et la caractérisation de l'exposition des personnes aux champs EM. La seconde étude va s'intéresser à l'influence des conditions de propagation, dues à un environnement métallique confiné, sur l'évaluation de l'exposition passive des personnes.

3.1. Contexte

Le nombre croissant de systèmes de télécommunication sans fil s'accompagne de questions relatives à l'exposition des personnes vis-à-vis des champs électromagnétiques [AFS09, MIN09, PEC09, STA09, MIN10, CEA11, COM11]. Fortement exprimées vis-à-vis des systèmes de téléphonie mobile cellulaire et notamment autour de l'implantation d'antennes relais, ces inquiétudes et ces questions touchent également les systèmes sans fil associés aux services haut débit (WiFi ou WIMAX, par exemple).

Afin de protéger les personnes vis-à-vis des effets sanitaires possibles des ondes radioélectriques, des niveaux de protection ont été recommandés par la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP http://www.icnirp.org).

L'ICNIRP dans son "Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques" pour les champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz) a distingué deux types de grandeurs tant dans le domaine grand public que pour les professionnels [ICN98, ICN09].

Les restrictions de base: Valeurs limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques de fréquence variable, qui sont établies directement à partir d'effets sur la santé avérés. Selon la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier ces valeurs limites sont:

- La densité de courant J (A/m^2),
- Le débit d'absorption spécifique DAS (W/kg),
- La densité de puissance S (seule la densité de puissance dans l'air, à l'extérieur du corps, peut être facilement mesurée chez les personnes exposées).

Les niveaux de référence: Ces niveaux sont indiqués à des fins d'évaluation pratique de l'exposition, afin de déterminer s'il est vraisemblable que les restrictions de base ne soient pas dépassées. Certains niveaux de référence sont dérivés des restrictions de base correspondantes au moyen de techniques de mesure et/ou de calcul, et d'autres sont liés à la perception et aux effets nocifs indirects de l'exposition aux champs électromagnétiques.
Les grandeurs dérivées sont:

- L'intensité de champ électrique E (V/m),
- L'intensité de champ magnétique H (A/m),
- La densité de flux magnétique B (μT),
- La densité de puissance S (W/m^2),
- Les courants passant dans les membres I (A).

Les grandeurs liées à la perception et à d'autres effets indirects sont:

- Le courant de contact I_c (A),
- L'absorption spécifique AS (J/kg), pour les signaux pulsés.

Quelles que soient les conditions d'exposition, les valeurs mesurées ou calculées de l'une quelconque de ces grandeurs physiques peuvent être comparées aux niveaux de référence correspondants. Le respect du niveau de référence garantit le respect de la restriction de base. Si la valeur mesurée ou calculée dépasse le niveau de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement que la restriction de base soit dépassée. Toutefois, tout dépassement du niveau de référence impose de vérifier le respect de la restriction de base correspondante et de déterminer si des mesures de protection complémentaires sont nécessaires.

Pour le grand public, les restrictions de base imposent que la puissance absorbée par kilogramme (débit d'absorption spécifique ou DAS) soit au maximum de 0,08 W/kg pour le corps entier et au maximum de 2 W/kg pour 10 grammes de tissus contigus. Étant donné la complexité de la mesure in situ du DAS, l'ICNIRP a également défini (sur la base d'études menées sur la relation entre la densité surfacique de puissance d'une onde plane et la puissance absorbée par un ellipsoïde représentant un être humain) des niveaux de référence déduits des restrictions de base et exprimés en valeur efficace de champs ou en densité surfacique de puissance et fonction de la fréquence émise.
Du point de vue réglementaire, la commission européenne dans sa recommandation du 12 juillet 1999 (1999/519/CE) a repris les recommandations de l'ICNIRP. En France, cette recommandation européenne a été transcrite en droit français (décret n°2002-775 du 3 mai 2002).
Les systèmes de communication sans fil doivent donc être conformes à ces réglementations nationales et européennes. Mais les questions et inquiétudes du public font que cette mise en œuvre doit également prendre en compte le besoin d'information exprimé par les utilisateurs quant à leur exposition.

Afin de répondre à ces contraintes multiples et parfois contradictoires, il est essentiel de disposer d'outils de simulations, de mesures et de protocoles permettant l'évaluation de la conformité et l'estimation de l'exposition.
Vu la complexité des nouveaux systèmes, l'évaluation de l'exposition présente de nombreuses difficultés.

C'est à travers les différents projets de recherche et la normalisation que progressivement, il est possible de mieux appréhender la caractérisation de l'exposition par des recherches en métrologie, des vérifications de tous ordres, des simulations et des expérimentations.

3.2. Contribution au Projet ANR MULTIPASS

3.2.1. Historique

Dans le cadre des précédents projets du Réseau National de Recherche en Télécommunications COMOBIO et ADONIS, des méthodes de mesure et de calcul du DAS et du champ électrique induit par les systèmes de téléphonie mobile cellulaire de 2^{e} et de 3^{e} génération (GSM et UMTS) ont été étudiées.

Ces projets ont contribué à l'élaboration de protocoles de mesure (mesure de DAS en laboratoire, fantôme, liquide équivalent, méthodologie de mesure in situ) tant au niveau national (protocole de mesure ANFR [ANF11]) qu'au niveau européen (normes CEI/CENELEC [CEN08]). Ces études ont également permis de spécifier des équipements aujourd'hui commercialisés par un des partenaires du projet.

Ces protocoles et moyens de mesure doivent être étendus aux nouveaux systèmes sans fil associés aux services haut débit. En effet les outils actuels connaissent des limitations importantes avec ces nouveaux systèmes.

Les outils de mesures de DAS qui existent actuellement ont été développés pour des systèmes utilisant des protocoles de communication tels que ceux du GSM (TDMA) ou de l'UMTS (CDMA) et n'ont pas été conçus pour mesurer le DAS induit par des systèmes ayant des émissions non régulières (la réponse de la sonde pouvant dépendre de la forme de l'enveloppe du signal).

Ces outils sont également confrontés aux problèmes liés à la montée en fréquence des signaux de type WiFi, WIMAX ou LTE. Aux fréquences élevées, les sondes de mesure de DAS doivent être de plus en plus petites pour pouvoir aller à proximité immédiate de la surface des fantômes où la puissance est très majoritairement absorbée.

De même, les outils actuels de mesure in situ du champ électrique ne sont plus adaptés du fait des problèmes liés aux émissions non régulières des systèmes de type 802.11, 802.15, 802.16 ou LTE. Ces outils doivent pouvoir estimer l'exposition au trafic maximum qui est un des points importants du protocole de mesure ANFR *In-Situ* et qui est imposé par le décret du 3 mai 2002 (décret n°2002-775). Cette évaluation au trafic maximum des systèmes actuels utilise le canal pilote pour les systèmes UMTS ou GSM, mais ce canal pilote n'existe pas pour les systèmes WLAN de type WiFi ou WIMAX.

Enfin, les protocoles actuels de mesure *In Situ* ne sont pas adaptés à la situation actuelle où les sources RF sont de plus en plus nombreuses et ont des fréquences et des protocoles différents, mais aussi des émissions non périodiques. Cette situation est d'autant plus délicate que les niveaux de référence de l'ICNIRP ont été dérivés des restrictions de base avec des configurations simplifiées et des ondes ayant des émissions régulières. Il devient donc nécessaire de vérifier la validité de ces niveaux de référence dans des configurations plus réalistes et avec des signaux de systèmes sans fil associés aux services haut débit.

3.2.2. Le projet MULTIPASS

C’est d’abord l’acronyme de "MULTIPle sources exposure ASSessment": projet pluriannuel qui s’étant déroulé de 2007 à 2010 (**http://multipass.elibel.tm.fr/)**.
Les partenaires du projet ont été Orange Labs, Supélec, Satimo, Xlim (Université de Limoges) et l’ENST Bretagne.
Les principaux objectifs du projet Multipass sont présentés ci-après:

- Développer une méthode, fiable et robuste, pour la mesure "in situ" de l'exposition à des sources multiples ayant des émissions non régulières et/ou apériodiques.
- Étudier la relation entre le champ électromagnétique et l’exposition réelle des personnes.
- Développer les méthodes de mesure du DAS induit par des systèmes sans fil utilisant des protocoles de type "WiFi, WIMAX et LTE"**.**

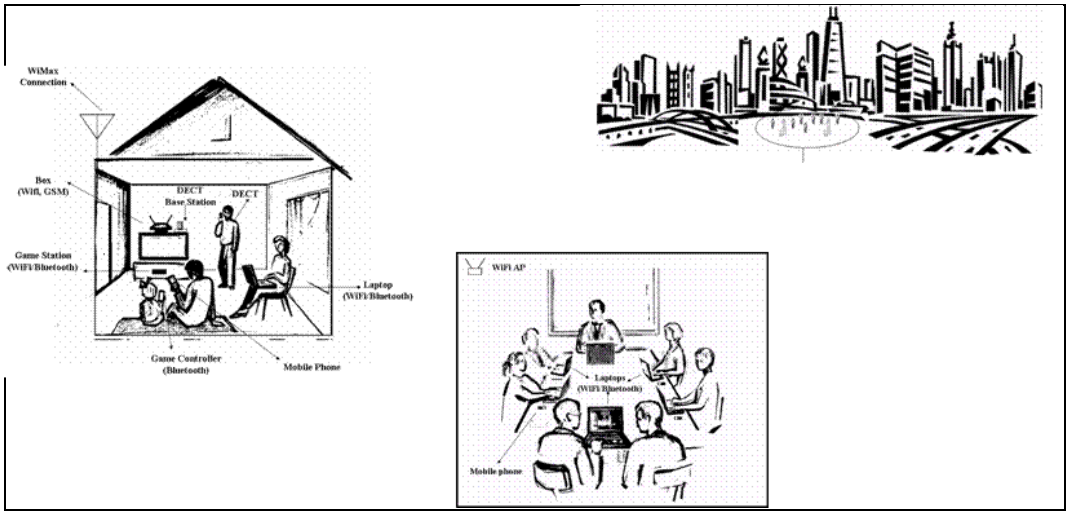


Figure 3-1 Plusieurs systèmes et plusieurs usages.

3.2.3. Travaux personnels dans le cadre du projet

On a travaillé sur l'amélioration de la métrologie afin de mieux caractériser les signaux de type "WiFi, WIMAX ou LTE". Cela a permis d'une part de contribuer à l'évolution du protocole de mesure *In-Situ* de l'ANFR et d'autre part, de participer à la définition du cahier des charges pour la fabrication d'une sonde de DAS ainsi que pour un dosimètre personnel afin de les rendre compatible avec les nouvelles technologies de communication.

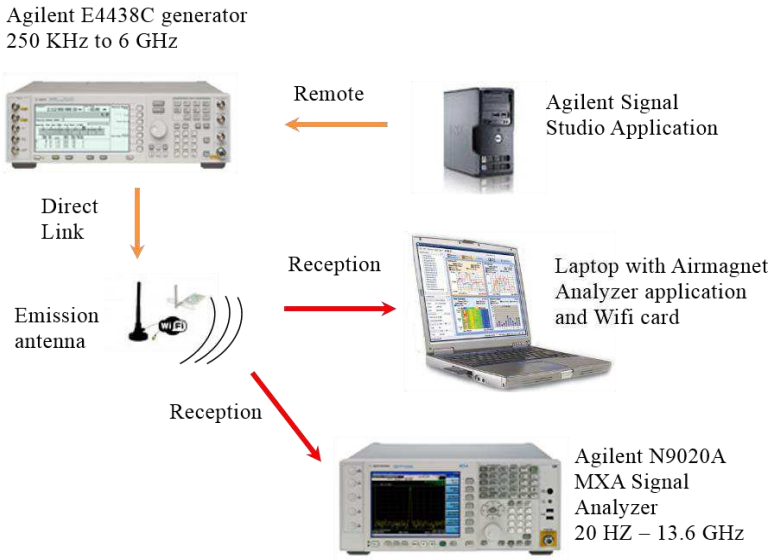


Figure 3-2 Chaine de mesure utilisée pour les systèmes WiFi.

Ces recherches ont été effectuées en prenant en compte le trafic réel transitant par les antennes ainsi que le rapport cyclique des trames lorsque cela était possible. On présente ci-dessus le principe de la mesure en WiFi (cf. fig. 3-2) et au paragraphe suivant les articles publiés dans le cadre de ce projet.

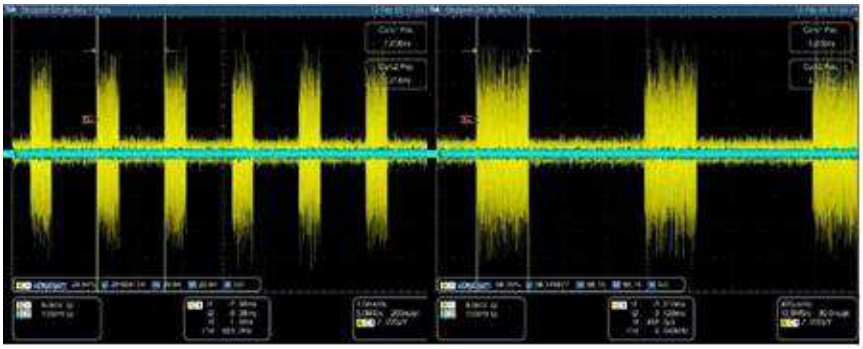


Figure 3-3 Exemple d'aspect temporel d'émissions pour un système WiFi émulé.

3.2.4. Principales publications associées au projet MULTIPASS

Les travaux qui ont été effectués dans le cadre du projet ont donné lieu à plusieurs publications dans les domaines de l'exposimétrie et de la métrologie en plus du rapport final. Quatre d'entre elles discutant de problèmes de normes de mesures et de grandeurs caractéristiques ou représentatives pour les systèmes de type "WiFi", les trois autres traitant des nouvelles technologies utilisées dans les systèmes de communications numériques sans fil et de leur impact sur les systèmes de mesures actuels, tous dans la perspective de l'évaluation de l'exposition des personnes aux champs EM.
Les systèmes de type "WiFi" cumulent deux problématiques en plus de l'OFDM: l'aspect aléatoire de ces émissions du fait du protocole d'accès à la ressource CSMA/CA et la durée extrêmement courte et variable des trames (généralement inférieures au temps de réponse des sondes de mesures).
La mesure du DAS ou de champs EM peut être simple quand on connait parfaitement la partie émettrice d'un équipement, assez facile avec un téléphone ou avec un système disposant d'antenne(s) extérieure(s) et/ou ayant un diagramme d'émission connu. Dans le cas d'un PC portable, cela devient très difficile, car les antennes peuvent être disposées n'importe où, l'émission pouvant aussi changer suivant les périphériques connectés (clé USB, souris, …) à l'instant de la mesure.

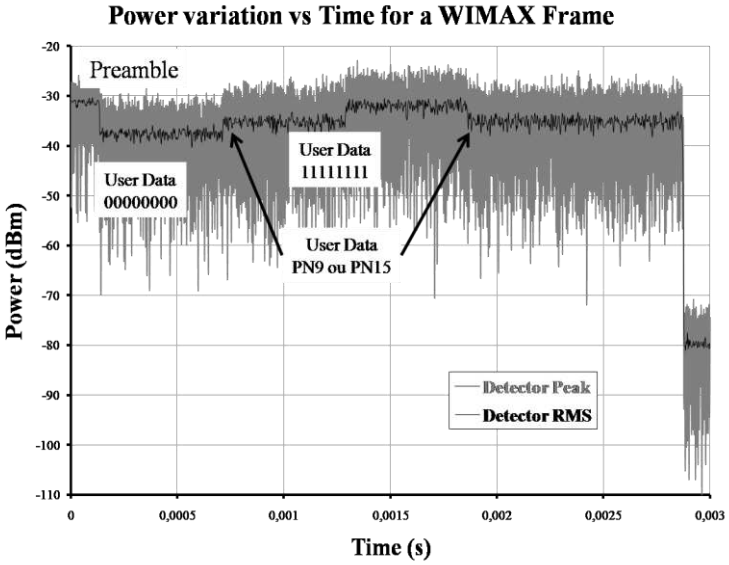


Figure 3-4 Variation instantanée de la puissance d'un signal WIMAX.

La première problématique a donc été de caractériser l'émission EM générée par divers équipements intégrant la technologie WiFi (ordinateurs, points d'accès, clés, ...) dans différentes configurations d'utilisations et différents lieux. Les différents standards de WiFi (a, b, g, n, …) ont été étudiés et des mesures ont été réalisées sur site (réseau situé à l'intérieur des locaux de Supélec), pour la mesure du champ électrique E [LET09e] et dans des chambres réverbérantes, pour la mesure de la puissance totale rayonnée par un équipement [LET09g]. Les résultats ont montré qu'un seul équipement ne pouvait émettre à la fois (à cause du protocole d'accès utilisé) et que seuls les équipements les plus proches contribuent de façon significative à l'exposition des personnes (cf. Rapport ARCEP intitulé: « RLANs et champs électromagnétiques » de 2006).
Ensuite nous nous sommes intéressés à la mesure du DAS (normatif) résultant de ces équipements. Plusieurs études réalisées précédemment ont montrées que les bancs de mesures utilisés aujourd'hui ne sont plus adaptés, car utilisant des sondes, adaptées aux signaux de téléphonie mobile 2g et 3g et ayant des temps de réponse trop grands par rapport aux variations temporelles des signaux [RAN85, IEEE05, CEI05, NAL06, SAR06, ADA10, CAR10, MON10].

En tenant compte de ces problèmes et en l'absence de norme de mesures de DAS, nous avons proposé une méthode simple et robuste capable de donner une valeur de DAS maximale (protectrice pour les personnes).

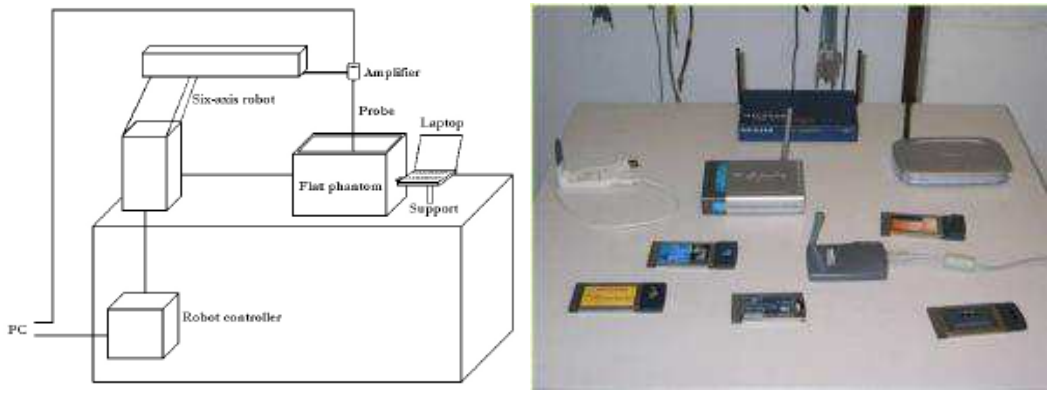


Figure 3-5 Système de mesure de DAS et matériels WiFi étudiés.

La méthode consiste à passer l'équipement en mode "test usine" quand il existe ou plus simplement à régler l'émetteur en son mode le plus bas débit (norme b à 1Mbps) et de l'obliger à émettre de façon continue (à l'aide d'un logiciel ou par un transfert d'un très gros fichier). La sonde, trop lente, intégre le signal comme un détecteur d'enveloppe (à la façon d'un filtre passe-bas). Les procédures et techniques de mesures détaillées sont expliquées dans les articles [LET09a, LET09f]. Des simulations et des tests ont été réalisés en utilisant la puissance totale rayonnée avec une antenne dipôle. La figure 3-5 montre qu'il n'y a que peu de différences entre la valeur du DAS obtenue par simulation et celle obtenue par la mesure effectuée à l'aide d'un système normatif utilisé pour la téléphonie mobile.

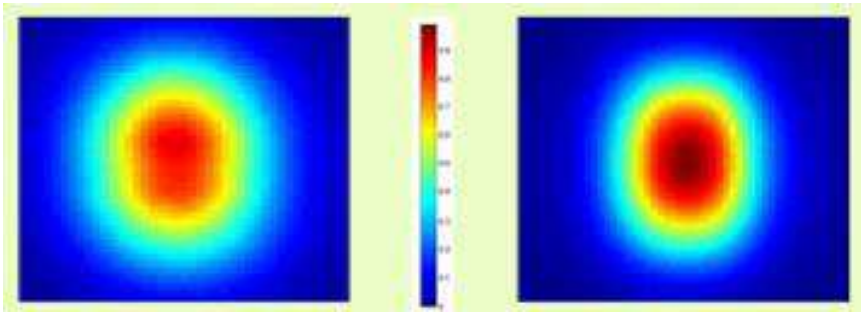


Figure 3-6 Résultats de simulation et de mesure (même code de couleur).

Grâce à ces études, un cahier des charges a été établi, ce qui a permis à la société Satimo (partenaire sur le projet) de développer de nouvelles sondes de DAS et appareils de mesures de champs adaptées à ces nouvelles technologies. Des propositions ont aussi été faites pour modifier les matériels et protocoles de mesures DAS et *In-Situ* existants pour les adapter à chaque type d'équipement.

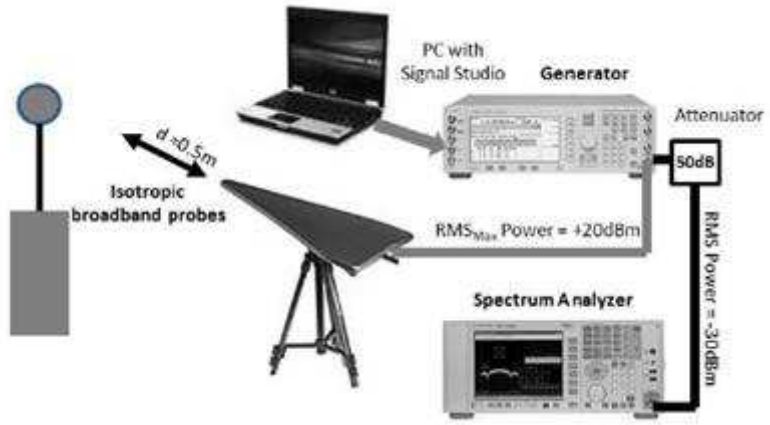


Figure 3-7 Exemple de banc test utilisé pour la caractérisation des sondes isotropiques large bande.

Les systèmes de communications sans fil évoluent très rapidement (WiFi ne représentant qu'une norme parmi d'autres), plus vite que les nouvelles versions de protocoles de mesures *In-Situ* pour l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (norme Européenne: EN50492 [CEI08] et française: ANFR v3 [ANFR11]) utilisables en France. Celles-ci donnant la possibilité d'utiliser une sonde isotropique de type large bande pour la réalisation des mesures. Les sondes actuellement disponibles sur le marché ne sont calibrées ou étalonnées que pour des signaux continus ou quasi continus (en régime établi ou CW), elles fonctionnent bien avec des signaux n'utilisant pas de modulations de type QAM ou OFDM qui sont utilisées dans les nouvelles technologies. Plusieurs études réalisées avaient déjà montrées cette sensibilité [THU06, JOS08a, JOS08b, BOR09, JOS10]. Lors de tests de mesure effectués à l'aide de sondes de mesures, nous avons constaté des différences significatives entre les différentes réponses obtenues (cf. fig. 3-8). Nous avons donc réalisé un banc de mesure (cf. fig. 3-7) qui va permettre de tester la réponse de plusieurs sondes de mesures de champs à différentes sollicitations: de la plus simple le CW aux technologies de dernière génération comme WIMAX ou LTE.

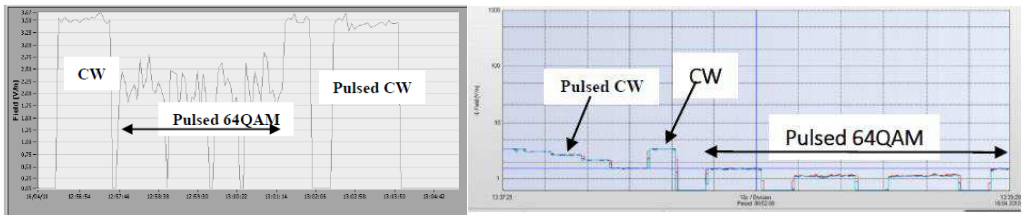


Figure 3-8 Valeurs de champ E (V/m) obtenues avec deux sondes différentes pour des signaux émis à la même puissance RMS, mais utilisant des modulations différentes.

Type du signal	Duty Cycle	Probe A (V/m)	Probe B (V/m)
WIMAX 2	0.09	0.29	0.36
WIMAX 4	0.11	0.33	0.36
WIMAX 6	0.20	0.45	0.36
WIMAX 8	0.26	0.51	0,36
WIMAX 10	0.32	0.56	0.36
WIMAX 12	0.37	0.61	0.36
WIMAX 14	0.42	0.64	0.36
WIMAX 16	0.49	0.70	0.36
Power Off	0.00	0.00	0.00
CW	1.00	1.00	1.00
Pulse 1/5	0.20	0.45	1.00
Pulse 2/5	0.40	0.63	1.00
Pulse 3/5	0.60	0.77	1.00
Pulse 4/5	0.80	0.89	1.00

Tableau 1 Valeurs de champ E relevées avec les deux sondes large bande vs forme d'onde.

Nous avons comparé la réponse fournie par deux sondes (probe A et probe B) couramment utilisées à des stimuli utilisant ces types de modulations par rapport à des signaux sans modulation, mais avec des puissances moyennes ou rms équivalentes. Les résultats obtenus montrent des différences significatives entre les réponses aux différentes sollicitations (cf. fig.3-8), avec un résultat sous-estimant les niveaux réels de puissance pour les nouvelles formes d'ondes récemment apparues [LET11c, LET11d].

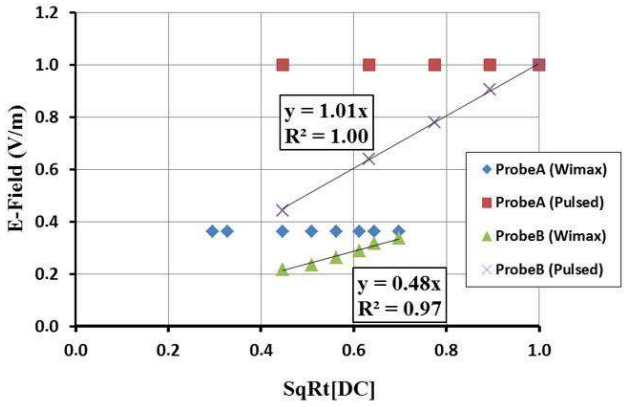


Figure 3-9 Différentes réponses de sondes à des signaux émis à des puissances RMS identiques modulées ou non.

Deux types de systèmes de mesure ont été testés avec différentes formes d'ondes: les sondes isotropiques à large bande (mesures dans le domaine

temporel), les analyseurs de spectre de milieu de gamme utilisés pour les mesures normalisées (mesures dans le domaine fréquentiel). Les résultats montrent une désensibilisation, par rapport à des ondes CW, des différents systèmes lorsqu'ils sont soumis à des signaux à fort facteur de crête (cf. fig. 3-9 et 3-10).

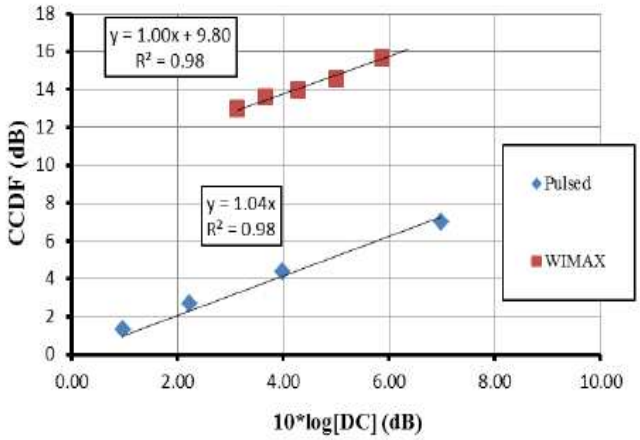


Figure 3-10 Effet de la valeur du DC sur la valeur du CCDF.

Dans certaines configurations, une correction peut être utilisée lorsque la statistique d'émission des signaux est connue [LET13b].
Il est aussi apparu que les valeurs maxima (très protectrices, mais restrictives) ou efficaces (pas assez protectrices) ne suffisent plus pour assurer le bon fonctionnement des systèmes dans le cadre de la CEM ou d'évaluer de façon correcte l'exposition réelle des personnes.

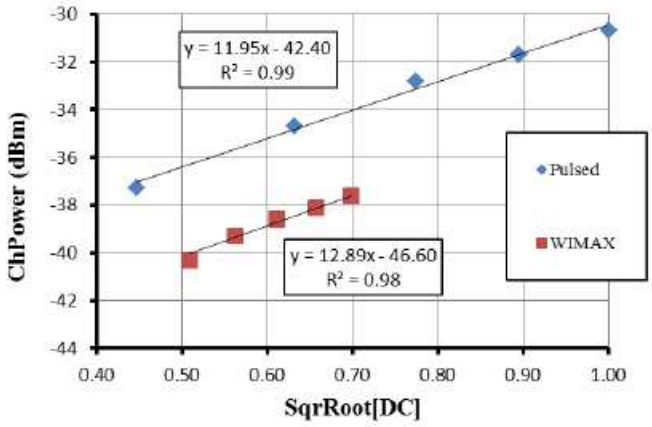


Figure 3-11 Effet de la valeur du DC sur la puissance moyenne mesurée.

Les résultats montrent que les sondes large bande (à base de détecteur à diode) ne sont pas adaptées à la mesure des champs EM produits par les nouvelles technologies sans fil. La forte valeur de leur PAPR ou CF augmente l'erreur de mesure et réduit de façon significative leur sensibilité. Leur manque de rapidité (temps de réponse plus grand que les variations des signaux) sous-

estime les valeurs de champs EM. Nous avons proposé deux améliorations possibles:

- Augmentation de la bande passante pour suivre les largeurs de bandes utiles des nouvelles technologies et diminuer les temps de réponse des sondes,
- Application d'un facteur de correction pour compenser l'erreur de mesure, deux valeurs avaient été proposées: 2.78 et 2.08 respectivement pour les sondes A et B.

Des tests avaient aussi été réalisés avec des analyseurs de spectre. Les résultats montraient que la méthode la plus fiable pour faire les mesures consistait à utiliser le mode "Channel Power" donnant la valeur de la puissance RMS du signal à un instant donné sans perte de puissance, en intégrant le signal sur toute la bande utile et non pas sur la bande du filtre de résolution qui est souvent inférieure sur les analyseurs utilisés. Avec en complément le paramètre statistique CCDF qui à lui seul regroupe et relie les deux paramètres: valeur rms et crête/peak en tenant compte de la statistique de la variation temporelle du signal. L'ancienne méthode qui utilisait la commande "Max Hold" n'indiquait que la valeur maximale atteinte à l'instant de la mesure.

3.2.5 Conclusions

Les systèmes de mesure actuels utilisés pour l'évaluation de l'exposition des personnes, même s'ils ont évolué, ne sont pas adaptés ou calibrés pour des signaux numériques complexes comme par exemple: LTE, WIMAX ou WiFi. Ces signaux utilisent des bandes de fréquences très larges (jusqu'à 160 MHz pour WiFi ac), des modulations de type OFDM et émettant sous forme impulsionnelle entrainant des variations de puissance très rapides et de grandes dynamiques (mode de fonctionnement plus proche d'un mode impulsionnel).
Des modifications doivent donc être rapidement faites. Pour les systèmes de mesures fonctionnant dans le domaine temporel à base de sondes large bande, les fabricants vont devoir étalonner les appareils en CW, les tester avec les nouvelles formes d'ondes et les corriger ou recalibrer au besoin. Pour les systèmes fonctionnant dans le domaine fréquentiel utilisant un analyseur de spectre couplé à une antenne de référence, les constructeurs vont devoir augmenter les résolutions des appareils (aujourd'hui le RBW max réel est de ~110MHz pour des appareils de laboratoire). Une autre solution serait de travailler en temporel puis de faire des calculs (FFTs) très rapides avec un nombre d'échantillons très important pour revenir dans le domaine fréquentiel (en vérifiant qu'il n'y a pas d'erreurs dues aux manques d'ergodicité et de stabilité des signaux sur la durée des calculs).
La solution qui est aujourd'hui en discussion dans les organismes de normalisation consiste à utiliser, pour certains systèmes modernes (WiFi, WIMAX et LTE), un décodeur dédié à un système qui indiquera la grandeur

estimée ou extrapolée par le terminal et donc dépendant fortement du système (manque d'indépendance).

3.3. Étude de l'exposition passive des personnes dans le métro Parisien ou le RER.

Depuis plusieurs années, la RATP a déployé dans ses infrastructures des stations de base pour la téléphonie mobile de 2e et de 3e génération (GSM, UMTS) et de nombreux clients utilisent largement leur téléphone portable dans les voitures RATP que ce soit dans le RER, le métro, les autobus ou le tram. L'environnement de propagation spécifique (métallique et confiné), très éloigné de l'espace libre, va devoir être étudié et pris en compte pour l'évaluation de l'exposition des passagers. Très peu de documents (publics) fonts états de résultats de réalisations de mesures d'exposition des personnes dans les transports publics et seule une étude sur les conditions de propagation des ondes EM dans les trains a servi de référence à cette étude [KHE09].

Dans le cadre d'échanges de la RATP avec Supélec, il a été convenu d'évaluer l'exposition "passive" maximale de voyageurs situés dans une voiture du RER. Par exposition passive, on entend l'exposition d'un voyageur n'utilisant pas lui-même son téléphone portable, mais exposé à un ou plusieurs téléphones portables de voyageurs voisins.

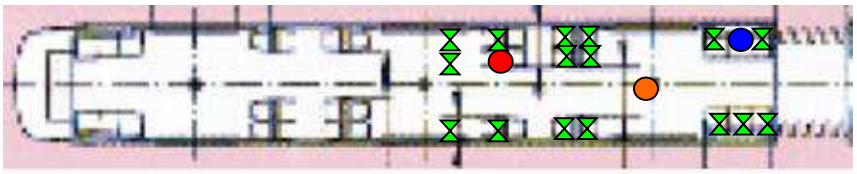


Figure 3-12 Position des émetteurs GSM/UMTS dans la rame de métro.

Pour réaliser cette étude, Supélec a collaboré avec la RATP (mise à disposition de plusieurs rames de métro et de RER sur des sites de maintenance) afin de caractériser les champs électromagnétiques produits par des téléphones portables émettant en permanence à puissance maximale et utilisés par des personnes volontaires de Supélec ou de la RATP comme si elles étaient en situation de téléphoner. À la fin de cette étude, un rapport a été remis à la RATP avec pour conclusion deux constatations:

- Les structures métalliques (barres support de sièges, parois, …) modifient les conditions de propagation (décroissance des champs EM moins rapide qu'en espace libre)
- Le champ EM décroît rapidement en fonction de la distance lorsqu'il y a peu de voyageurs dans un compartiment, avec une valeur diffuse non

nulle de l'ordre de 0,5V/m dans l'ensemble de la rame. À la place la plus proche de la personne qui téléphone, le champ moyen ne dépasse que rarement 3V/m.

Figure 3-13 Mesures de champ réalisées dans une rame de métro avec ou sans la présence de personnes.

D'une personne à l'autre, la variabilité du champ électromagnétique est importante, elle dépend à la fois du type de téléphone et de la façon dont la personne tient son téléphone mobile (des variations de 3 à 10 dB peuvent être rencontrées).
L'effet de réflexion sur les différentes structures peut être mis en évidence par la faible décroissance du champ à partir d'une certaine distance à la personne qui téléphone et par les fluctuations de champ mesuré en différents points de la rame.

Chapitre 4
Domaine de l'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques (2ème partie)

4.1. Autres études liées à l'exposition des personnes

Dans ce quatrième chapitre dédié à l'évaluation de l'exposition, ce ne sont plus les systèmes de communications sans fil qui vont être étudiés, mais les sources potentielles d'émissions non désirées et non intentionnelles provenant d'équipements électriques domestiques et de systèmes de distribution de l'énergie. Tout système électrique ou fil parcouru par un courant électrique non ou mal blindé peut-être contributeur à l'exposition des personnes aux champs EM. Les résultats de trois études, réalisées en réponse à des saisines ou demandes faites auprès des agences sanitaires françaises et entreprises, sont présentés dans les sections suivantes.

4.1.1. Caractérisation des émissions électromagnétiques produites par différents appareils électroniques grand public

La prolifération de matériel communicant tant en téléphonie mobile qu'au plan domestique, induit une inquiétude croissante dans les domaines de la compatibilité électromagnétique et de l'exposition du public aux champs électromagnétiques.

Figure 4-1 Exemple de matériel électronique testé.

On parle beaucoup de l'exposition due à la téléphonie mobile et au WiFi, mais très peu d'études ont été faites sur des équipements ou appareils, émettant de façon intentionnelle ou non, que l'on trouve couramment à la maison ou au bureau.

Plusieurs documents de référence donnent les principes et procédures à utiliser lors de mesures de champs EM basse fréquence (BF) [IEC98, ICN01, CEN10, ETS10] dans le cadre de l'évaluation de l'exposition des personnes due à des systèmes électriques. Une étude complémentaire [KRA05] réalisée sur un panel d'équipement domestique équivalent à celui de notre étude donne les valeurs de DAS de ces différents matériels. Ici notre préoccupation était un peu différente, il nous fallait comparer les valeurs de champ électrique obtenue à la distance et dans les conditions réelle d'utilisation des équipements (champ proche à très proche), d'où la nécessité de développer un nouveau protocole de mesure non normatif.

Le protocole de mesure proposé est original, car il a été choisi pour sa simplicité et au fait que l'on voulait comparer les émissions EM de matériels très différents comme des fours, des plaques à induction, des lampes à basse consommation, des modems ADSL (couramment appelées box) avec WiFi, des téléphones DECT ou GSM, … et travaillant dans des bandes de fréquences très différentes.
Les résultats présentés dans cette étude ne représentent qu'une partie des mesures réalisées dans ce cadre. La plupart des équipements testés ont été acquis dans la grande distribution.

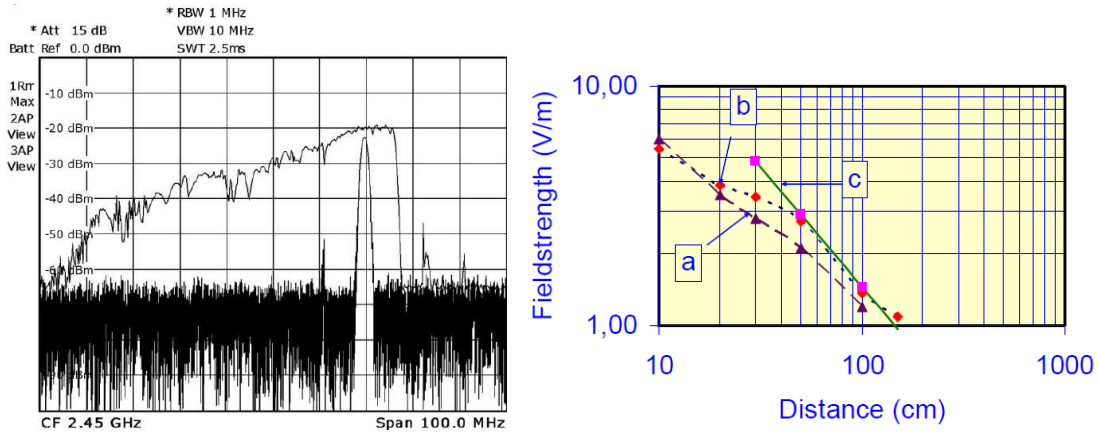


Figure 4-2 Résultats obtenus pour 1 four micro-onde.

Pour les systèmes utilisant des fréquences supérieures à 300MHz, le choix a été fait de ramener l'émission de cet équipement à un émetteur équivalent parfait (antenne isotrope) placé à une distance de 1m. La figure 4-2 montre un exemple de test effectué sur un four micro-onde du commerce: le spectre obtenu à l'aide d'un analyseur de spectre en mode "Span Zero" (à gauche) et le résultat de modélisation (à droite) ou la courbe (a) correspond aux mesures avec la sonde large bande, la courbe (b) correspond aux mesures réalisées avec un analyseur de spectre et la courbe (c) correspond à la modélisation.

Nos investigations ont montré que tout appareil électrique ou électronique, communicant ou non émet un champ électromagnétique plus ou moins

important, pouvant potentiellement entrainer des problèmes de CEM ou d'exposition (Baby phone, lampes à basse consommation, four micro-ondes).

Tableau 2 Tableau de synthèse des résultats de mesures de champ E obtenus à une distance de 1m.

Équipements	E(V/m) mesurés	E(V/m) théoriques	Commentaires
Four micro-onde	1.4 (analyseur) 1.2 (sonde)	1.4	PIRE=70mW
AP WiFi «mode Idle»	0.17	0.18	PIRE(max)=100mW, DT=1%
AP WiFi «mode actif»	0.9	1.8	PIRE(max)=100mW
Téléphone DECT «mode stanby»	0.2 (analyseur) 0.3 (sonde)	0.3	PIRE(max)=100mW, DT=1%
Téléphone DECT «mode actif»	0.5 (analyseur) 0.6 (sonde)		
Téléphone GSM	2.4 (analyseur) 2.3 (sonde)	2.7	PIRE(max)=2W, DT=12.5%
Talkie Walkie	2.5 (analyseur) 3.3 (sonde)	2.4	PIRE=200mW

Les résultats complets obtenus au cours de cette étude ont été publiés dans l'article [LET11b].

4.1.2. Émissions électromagnétiques de lampes à basse consommation ou fluocompactes

Une autre de mes activités a été liée à la polémique relative aux ampoules à basse consommation (LBC) ou de type fluocompactes (LFC). Cela m'a amené à effectuer des recherches sur cette problématique, dans le cadre d'un partenariat avec l'AFSSET (agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, ANSES aujourd'hui) à la suite d'une saisine concernant les émissions électromagnétiques des lampes basse consommation de type fluocompacte. Le principe de fonctionnement et le modèle électrique utilisé pour les test de LBC reprennent les résultats des articles suivants [BRA04, DUR04, AZC05, HUA05, YAN05]. Les normes et protocoles de mesures normatifs existants [CIS02, CIS06, CEI12], par exemple, n'étant pas

ou mal adaptés à ce nouveau type de lampe, une proposition, non normative, a due être faite pour pouvoir répondre à la demande.
Ces études ont été réalisées, en collaboration avec le CSTB. Plusieurs articles apparaissant à l'époque dans des revues "grand public" ou sur des sites d'associations militantes avançaient des valeurs de champs EM assez alarmantes, mais elles étaient réalisées sans méthodologie adaptée.

Figure 4-3 Exemples de lampes fluocompactes appelées aussi "basses consommations".

La principale difficulté vient du fait des fréquences assez basses mises en œuvre sur une large bande de fréquences, de quelques kHz jusqu'à plusieurs MHz, d'un possible couplage entre la LFC et l'antenne du système de mesure (mesures réalisées en champs proches) et donc de l'obligation de faire deux mesures de champs indépendantes pour la partie magnétique (H A/m ou B μT) et pour la partie électrique (E V/m).
L'élément critique est un circuit électrique ajouté dans le culot des lampes: le "starter" ou "ballast" qui sert à élever la tension d'alimentation des lampes servant à l'accélération des électrons dans le tube (principe identique utilisé dans les tubes néon).

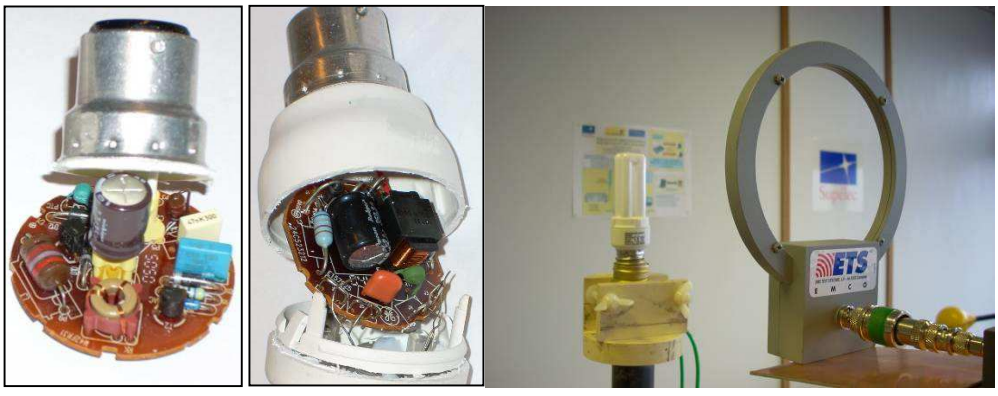


Figure 4-4 Exemples de circuit "ballast" et dispositif de mesure du champ magnétique utilisé.

Les résultats obtenus, pour un grand panel de LFC vendues dans la grande distribution, montrent une grande disparité sur les valeurs de champs mesurés (facteur x100), pas de corrélation entre la puissance lumineuse de la lampe et le champ ou avec la marque (fabricant). Cependant, les champs EM restent malgré tout très faibles et non mesurables au-delà de quelques dizaines de cm, ils restent très inférieurs aux normes actuelles d'exposition, mais peuvent poser des problèmes de CEM à courte distance. Les résultats de ces différentes études sont repris dans l'article [LET09c]. Dans le même contexte, une réflexion sur l'élaboration d'un protocole détaillé de caractérisation des émissions électromagnétiques fluocompactes a été engagée toujours en collaboration avec le CSTB, dans le but de proposer un protocole de mesure du champ électrique et magnétique émis par les LFC.

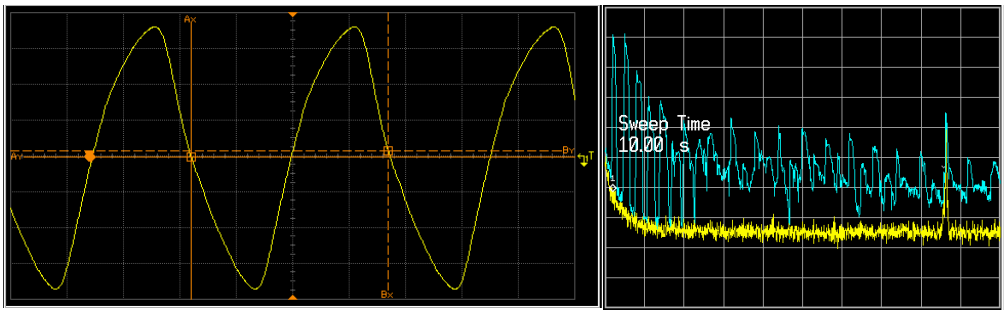


Figure 4-5 Variation du champ magnétique émis par une LFC: récupéré sur un oscilloscope (à droite) et sur un analyseur de spectre (à gauche).

Le protocole de mesure utilisé pour la vérification de conformité par les industriels était celui utilisé pour les lampes à incandescence. Ce protocole mis au point lors de l'étude des émissions électromagnétiques des lampes fluorescentes compactes à économie d'énergie est décrit dans l'article [LET09i].

Des recommandations ont aussi été faites pour réduire, autant que possible, les émissions radioélectriques non désirées comme par exemple l'utilisation d'un blindage au niveau du culot des ampoules et un meilleur câblage du circuit starter.

4.1.3. Étude de l'exposition de la population de Champlan (Essonne) au champ magnétique à 50 Hz réalisée en 2008

Supélec a participé avec l'AFSSET à la caractérisation de l'exposition des habitants aux champs magnétiques basses fréquences dans la commune de Champlan, dans le cadre du programme d'études d'expositions environnementales coordonné par l'ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Un rapport reprenant les résultats de l'étude et prenant

en compte d'autres risques écologiques ou sanitaires potentiels a été présenté au ministère de l'Écologie et du Développement durable.
Le choix de l'EMDEXII comme appareil de mesure s'est fait en se basant sur les résultats d'une étude précédente comparant plusieurs mesureurs de champs EM [Mag06] en fonction des sources domestiques potentielles étudiées et répertoriées dans les documents suivants [MAS07, INR09]. Le choix du protocole de mesure et de récupération des données qui a été utilisé lors de cette étude se base sur les recommandations provenant de documents décrivant les procédures et protocoles de mesure pour les champs magnétique BF [EPR01, CIG09, IEC09, UTE10].
L'objectif principal consistait à évaluer l'exposition individuelle, pendant 24 heures, de quelques habitants aux champs magnétiques issus de sources domestiques et des lignes de transport d'électricité très présentes sur la commune (cf. fig.4-6).

Figure 4-6 Quartier résidentiel le plus exposé à Champlan.

Cette étude montre clairement que les niveaux d'exposition aux champs magnétiques attendus directement sous les lignes de transport électrique haute tension (THT de 63 kV et 220 kV) à Champlan (Essonne) suivent les variations de la charge de ligne et n'excèdent pas 4 à 5 µT maximum (voir fig.4-7), dans les conditions présentes de mesure, et pour des situations très particulières (très grande proximité avec les lignes THT).

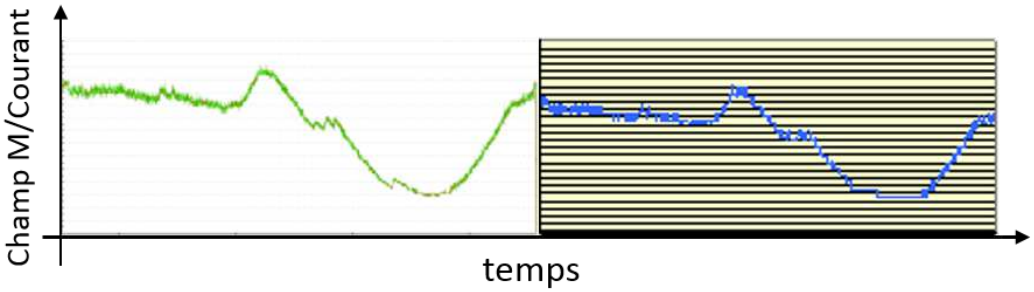


Figure 4-7 Corrélation entre la valeur du champ magnétique mesuré (à gauche) et la variation temporelle de la charge de la ligne THT (données RTE à droite).

Au fur et à mesure que la distance augmente, les valeurs de l'induction magnétique décroissent rapidement, pour devenir inférieures à 0,2 µT au-delà de 100 à 150 m.
De nombreux appareils électrodomestiques, mais aussi les portiques de détection antivols de certaines grandes surfaces induisent une exposition beaucoup plus importante (jusqu'à 30 à 50 µT pour certains fours), à des distances très courtes des sources (10 à 20 cm). Cependant, ces expositions sont généralement de courtes durées, et liées à l'utilisation, ponctuelle, de ces appareils (cf. fig. 4-8 courbe de gauche). La présence de ligne à très forte tension, à courte voir très courte distance, ajoutant un niveau de champ magnétique variable dépendant de la charge de la ligne (cf. fig. 4-8 courbe de droite).

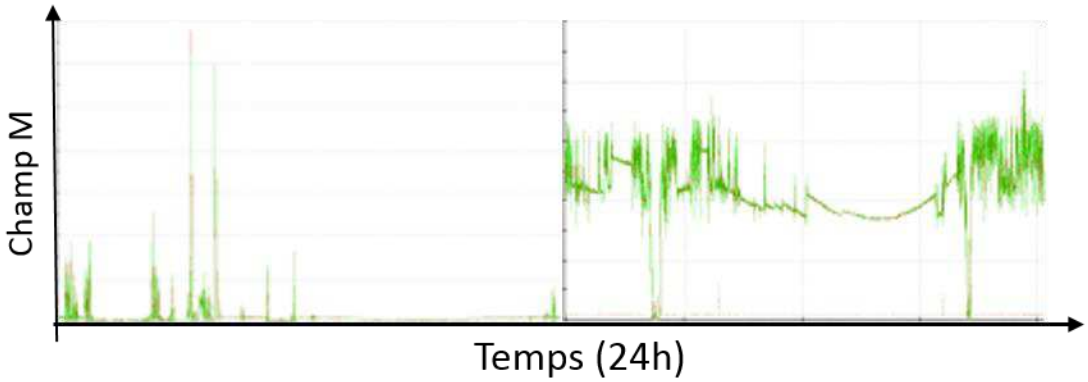


Figure 4-8 Exemples de résultats de mesure du champ magnétique sur 24h pour une personne située loin des lignes RTE THT (à gauche) et pour une personne vivant sous les lignes (à droite).

Bien que limitée en nombre de participants, cette étude de caractérisation de l'exposition humaine aux champs magnétiques basses fréquences montre qu'il est techniquement possible d'identifier les principales sources d'exposition, et de quantifier leur impact dans le cadre d'activités quotidiennes.

Tableau 3 Tableau des moyennes arithmétiques sur 24 heures.

Enquête	Code	Champ moyen 24h (µT) BB	Ecart type (µT) BB	Champ Maximum (µT)	Commentaires	AF	Nb mesures
1	O	1,33	1,01	6,65	Le maximum est du à l'utilisation d'un four à microondes	1	29232
2	A	0,11	0,19	6,79	Le maximum est du à l'utilisation d'un four à microondes et d'une bouilloire électrique	2	29157
3	G	0,78	0,22	11,97	Le maximum est du à un portique antivol en sortie d'une grande surface	1	29092
4	B	2,17	0,54	4,17	Le maximum est du à la proximité d'une ligne THT au niveau du jardin de la personne.	2	29347
5	E	0,17	0,11	2,61	Le maximum est induit par le passage sous les lignes THT	1	29042
6	D	0,10	0,28	5,49		2	29001
7	I	0,08	0,17	19,5	Passage à proximité d'un appareil électrique	1	29426
8	J	0,04	0,11	1,81		2	28227
9	M	0,21	0,5	3,43		2	29011
10	H	0,04	0,16	5,05		1	28984
11	L	0,07	0,09	1,67		2	28980
12	N	0,14	0,25	29,4	Problème avec le four à microondes	1	29104
13	P	0,54	0,92	10,57	Plaques électriques	1	29097
14	K	0,09	0,12	2,65	Travail à proximité de multiples appareils électriques	2	29192
15	Q	0,66	0,63	16,21		S	29071
16	R	0,08	0,27	14,21		1	29200
17	C	0,09	0,09	2,21		2	29231

Elle ouvre la voie à une meilleure prise en compte de l'exposition dans le cadre des études épidémiologiques qui cherchent à corréler l'existence d'effets sanitaires supposés des champs magnétiques de basses (LF) ou de très basses (ELF) fréquences avec l'exposition des personnes. Elle souligne également l'intérêt d'études de caractérisation de l'exposition de la population plus globalement, pour affiner notamment les modèles d'exposition en fonction des différentes sources électriques existantes dans la vie courante. Toutes les données de cette étude ont été publiées et sont disponibles dans l'article [LET09d].

4.1.4. Contributions à des magazines grand public (Science et Vie, Que Choisir, Quelle Santé, …).

J'ai également participé à la rédaction d'articles de vulgarisation dans des magazines grand public afin de répondre au questionnement de la population générale sur des sujets parfois polémiques comme les émissions électromagnétiques des lampes fluocompactes et LED ou l'efficacité des dispositifs anti ondes vis-à-vis des champs électromagnétiques.

Chapitre 5
Conclusion/Perspectives

De nombreux aspects liés à la compatibilité radioélectrique ou à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques ont été abordés tout au long des chapitres précédents.
Les résultats des différentes études montrent l'impact que peuvent avoir les nouvelles technologies, développées dans le cadre des radiocommunications pour améliorer les performances (QoS et augmentation des débits utiles), sur les autres systèmes (électriques ou radioélectriques) et sur les personnes.

Au chapitre 2, différentes études théoriques ont montré la sensibilité que peuvent avoir les différents composants constituants la chaîne de réception d'un système radio quand ils sont soumis à des signaux à large bande passante ou dont la forme d'onde varie très rapidement en fonction de la modulation utilisée.

La CRE entre plusieurs systèmes de radiocommunication a aussi été étudiée sous deux aspects.

En bande adjacente, il est possible de constater que même pour des signaux de faible puissance moyenne, mais de facteur de crête élevé, des problèmes de filtrage et de non-linéarités peuvent générer des produits d'intermodulation dans des systèmes voisins en fréquence pouvant brouiller des systèmes sensibles.

En co-site, dans la même bande de fréquence, la prise en compte des aspects temporels en complément des aspects fréquentiels et spatiaux permet de valider la coexistence de ces systèmes sous certaines conditions.

Les études du chapitre 3 se sont principalement focalisées sur les problématiques liées aux signaux dits "apériodiques" ou à variation d'enveloppe rapide comme le sont WiFi, WIMAX ou LTE. Les résultats obtenus montrent que les protocoles et les matériels de mesure ne sont pas toujours adaptés à ces systèmes. Des solutions existent et ont été proposées, comme par exemple un étalonnage spécifique des équipements de mesure et des matériels utilisés ; les caractéristiques obtenues en onde entretenue ne sont pas suffisantes, voire inadaptées en termes d'étalonnage lorsqu'on traite des signaux complexes.
Concernant les appareils de mesure de champ, des corrections peuvent être apportées aux résultats bruts de mesure pour tenir compte de la dynamique de ces signaux.

Enfin, une étude sur l'exposition des personnes dans le domaine des transports publics a été réalisée. Elle a permis d'étudier la propagation des ondes liées aux systèmes de téléphonie mobile dans un environnement confiné et métallique et de donner un ordre de grandeur des champs EM auxquels sont soumis les voyageurs.

Elle n'a pas permis de répondre à toutes les attentes, mais a ouvert une réflexion sur l'architecture qui pourrait minimiser l'exposition tout en garantissant le confort et la sécurité des personnes.

Le chapitre 4 était dédié à la mesure et à la caractérisation des champs électromagnétiques environnementaux dus à des équipements grand public couramment utilisés dans la vie courante (équipements domestiques, lampes à basse consommation) et aux lignes de transport de l'énergie THT.

Les conclusions de ces études montrent que les niveaux de champs EM, quel que soit le domaine de fréquence (BF ou RF) ne sont pas seulement le fait des lignes à très haute tension, des émetteurs de radiodiffusion ou de téléphonie mobile, très décriés par les médias ou les associations, mais aussi pour une grande part, de tous les équipements électriques que l'on utilise au quotidien sans savoir qu'ils produisent de façon non intentionnelle des rayonnements électromagnétiques non négligeables. Tout système électrique ou électronique, dans lequel circulent des signaux correspondant à des variations de tension ou de courant, est un émetteur de champ EM potentiel. Ses émissions sont plus ou moins importantes selon qu'il rayonne de façon intentionnelle ou non.

Nous avons vu dans ce document que des solutions existent pour évaluer ou prévoir les impacts potentiels d'un système sur son environnement immédiat et favoriser ainsi les cohabitations et le meilleur partage de la ressource radio (domaine de la CRE), et que des nouveaux critères de quantifications devront compléter les restrictions de base ou les niveaux de référence pour tenir compte de la variabilité fréquentielle et temporelle des signaux RF modernes (exposition des personnes aux champs EM).

Trois facteurs aggravants pouvant perturber ces actions:

- La multiplicité et l'évolution très rapide des systèmes (pas le temps de s'adapter aux nouvelles formes d'onde ou de prévoir les effets potentiels: "time to market" très réduit).
- L'agrandissement de la largeur de la bande utilisée par les signaux au-delà des capacités des systèmes de mesures.
- Mais aussi au fait que la notion de bande réservée à un système où une norme n'est plus la règle (exemple la bande GSM 1800 utilisables pour des services de téléphonie mobile de type GSM ou LTE).

5.1 CEM/CRE

Pour étudier les perspectives d'évolution après cette thèse, on peut envisager plusieurs types d'actions pour la CRE:

- Propositions d'étalonnage et de vérification des matériels de mesures plus pertinents pour tenir compte des particularités techniques mises en œuvre dans les nouveaux systèmes de radiocommunications,
- Optimisation du partage des bandes de fréquence, quelques exemples: pour les systèmes co-fréquences tenir compte de l'aspect temporel, meilleur "sensing" pour le "white space",
- Adaptation de la normalisation en CRE aux nouvelles formes d'ondes, tenant mieux compte des risques de non-linéarités, d'intermodulation,
- Recherche de nouveaux critères ou paramètres dans ces domaines.

5.2 Exposition des personnes

De même, pour l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques:

- Révision des normes et des appareils de mesures utilisés pour l'évaluation de l'exposition,
- Optimisation des nouveaux systèmes, plus seulement en fonction de la qualité de service ou de la performance, mais en tenant compte de possibles effets en terme d'exposition,
- Contribution à la rédaction du nouveau rapport ANSES (fin-2013) relatif aux effets des ondes électromagnétiques prenant en compte les formes d'onde,
- Participation à la rédaction du 2^{e} rapport du COMOP/Copic; Baisse de l'exposition des personnes => réflexion/question ? la baisse de puissance des émetteurs entraine-t-elle une baisse de l'exposition (plus de stations de base, mais moins puissantes),
- Réflexion sur la notion "d'électro-smog" ou brouillard électromagnétique (cf. associations antiondes): à la maison, au bureau, dans les transports, … tout rayonne: appareils électriques/électroniques et de communications, câbles (télécommandes, ADSL, CPL), lampes, …

5.3 L'Électro Hyper Sensibilité (EHS) ou hypersensibilité électromagnétique

- Meilleure prise en compte des personnes,
- Meilleure compréhension du phénomène (diagnostique),
- Recherche des causes,
- Recherche d'un appareil de mesure adapté.

Un projet de type exploratoire a été proposé au comité de dialogue de l'ANSES:
Les appareils de mesure de l'exposition individuelle aux rayonnements électromagnétiques disponibles aujourd'hui sont adaptés soit à la mesure de champs forts (situations professionnelles), soit à l'estimation de l'intensité maximale du champ électrique rencontrée dans l'environnement sur une période de temps donnée.

Les mesureurs actuels de l'exposition personnelle aux champs électromagnétiques semblent adaptés à l'enregistrement des valeurs instantanées du champ électrique dans les bandes de fréquences des télécommunications mobiles, dans une approche de surveillance des niveaux d'exposition et de comparaison aux valeurs limites réglementaires, mais ne fournissent pas d'information sur d'autres paramètres de l'exposition tels que:

- La caractérisation de l'évolution temporelle fine des signaux,
- La localisation précise de l'enregistrement (coordonnées GPS),
- La modulation des signaux.

Certains de ces paramètres ont été décrits par des personnes EHS comme pouvant être associés à des symptômes ressentis. Ce projet propose de répertorier et/ou de construire de nouveaux indicateurs de l'exposition aux champs électromagnétiques et de les documenter par le biais du développement d'un prototype de mesureur d'exposition.
Dans une seconde phase, cet appareil pourrait être utilisé dans le cadre d'une étude pilote de mesure de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radiofréquences, adaptée aux personnes EHS. La possibilité de localisation précise par système GPS ou l'enregistrement vocal de la description de symptômes éventuels ressentis permettrait d'améliorer les conditions de la recherche dans ce domaine.
Une proposition a été soumise par un consortium comprenant Supélec (projet nommé SENSEEM visant à la création d'un espace d'exploration du sensible en environnement électromagnétique contrôlé) dans le cadre de l'appel à projet de recherche (APR) 2013 de l'ANSES.

L'objectif de ce projet est de concevoir un espace mobile instrumenté dédié à différentes approches de la perception de l'exposition aux radiofréquences

dans un environnement électromagnétique caractérisé et contrôlé permettant d'étudier l'effet de l'exposition des personnes à différents signaux RF (téléphonie, WiFi, DECT, TNT, …) en prenant en compte leurs caractéristiques temporelles, et à terme:

- De fournir la possibilité à des médecins d'utiliser cet équipement comme outil de diagnostic ou thérapeutique en concertation avec leurs patients,
- De réaliser des études de dosimétrie, d'épidémiologie ou autres investigations sur l'exposition humaine, publique ou professionnelle, en environnement électromagnétique contrôlé non stressant,
- D'offrir la possibilité à des citoyens de tester leur sensibilité aux champs RF environnementaux, par exemple dans le cadre de prestations pour des collectivités locales, des entreprises, ou d'enseignements au profit de diverses institutions.

Chapitre 6
Annexe et Références

Expertise

Mes travaux d'expertise me permettent de participer à des commissions nationales importantes dans le domaine des télécommunications et de l'exposition des personnes aux émissions électromagnétiques.
Je participe comme membre expert technique aux activités des commissions ou groupes de travail suivants:

ComOp puis du COPIC (ComOp suite)

Le comité opérationnel (COMOP) a été créé, en juillet 2009, suite à la table ronde sur les radiofréquences, organisée par le ministère de la Santé en mai 2009, avec le concours du ministère du développement durable et de l'énergie (MEDDE) et du secrétariat d'État chargé de la prospective et du développement de l'économie numérique.

Il réunit l'ensemble des parties prenantes: État, collectivités locales, opérateurs de téléphonie mobile et industriels du secteur, associations de défense des consommateurs et de protection de l'environnement, organismes publics, avec l'appui administratif et financier du MEDDE et l'appui technique de l'agence nationale des fréquences.
Ce comité opérationnel a été chargé d'explorer deux volets:

- D'une part, la faisabilité technique d'un abaissement de l'exposition aux radiofréquences émises par les antennes relais de la téléphonie mobile au moyen de la réalisation de modélisations dans plusieurs quartiers des niveaux d'exposition et, le cas échéant, d'expérimentations des conséquences d'une diminution de cette exposition, afin d'en évaluer l'impact sur la couverture réseau, la qualité du service rendu aux usagers, le nombre d'antennes et l'exposition des utilisateurs de téléphonie mobile,
- D'autre part, la définition et l'expérimentation de nouvelles procédures de concertation et d'information locales pour accompagner les projets d'implantation d'antennes relais.

Groupe de travail d'experts en RadioFréquences et Santé (GT RF&Santé) de l'ANSES

L'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (ANSES) a pour mission de réaliser l'évaluation des risques sanitaires et de fournir aux autorités compétentes et à l'ensemble des parties

prenantes issues de la société civile toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise scientifique et technique nécessaire à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion des risques. Elle peut être saisie pour répondre à différentes saisines et peut éventuellement, si besoin, s'autosaisir.
Pour toute évaluation de risque sanitaire, l'expertise produite par l'agence est une expertise collective. Pour cela elle nomme des experts indépendants dans le cadre de collectifs d'experts (CES: Comités d'Experts Spécialisés, GT: Groupes de Travail et GECU: Groupes d'Expertise Collective d'Urgence).

Le GT Radiofréquences et Santé a pour missions de:

=> Publier annuellement une note d'actualité visant à mettre à jour l'expertise collective relative aux effets sanitaires des radiofréquences.
=> Réaliser la mise à jour du rapport Afsset 2009 et analyser environ 50 articles (sur un total de 270) parus entre 2009 et 2012.
=> Répondre aux questions posées par le développement de nouvelles technologies ainsi qu'aux demandes d'expertise adressées à l'agence (saisines relatives par exemple aux systèmes RFID, aux scanners corporels, aux systèmes anti ondes, aux dispositifs destinés aux jeunes enfants, …).
=> Proposer annuellement des recommandations d'orientations de recherche destinées à alimenter les Appels à Projets Recherche dans le domaine des RF (APR).
=> Analyser des propositions de projets de recherche.
=> Informer les parties prenantes des nouveaux résultats de la recherche et contribuer au débat public.
=> Participer au comité de dialogue.
=> Proposer des Projets d'Investigation Exploratoire (PIE) sur les thèmes de l'impact des nouveaux systèmes et usages pour les communications sans fil et de l'adaptation de la métrologie aux personnes électro-hypersensibles (EHS).

Les experts du groupe peuvent aussi être amenés à répondre à des saisines sur des sujets bien particuliers comme les dispositifs radioélectriques pour les enfants ou les risques sanitaires liés à l'utilisation des scanners corporels "Rapport d'expertise collective: Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes millimétriques Eqo, 2012".

Groupe de travail de l'Agence Nationale des Fréquences "Protocole de mesure de champ In-Situ"

C'est un groupe de travail regroupant la plupart des parties prenantes: l'Agence nationale des fréquences (ANFR), les opérateurs de téléphonie mobile et des

industriels du secteur, les laboratoires accrédités COFRAC pour ce type de mesures, dans le but d'établir le nouveau protocole de référence (France) de mesure In-Situ pour l'évaluation de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radio fréquence ainsi que ses évolutions. Ce protocole doit intégrer la norme Européenne CEI / Cenelec EN50492 (NF EN) ainsi que la prise en compte des nouvelles normes de communications:

=> Propositions de techniques de mesure spécifiques aux normes WiFi n, WIMAX et LTE capables de répondre aux exigences de la norme EN50492 et du protocole de mesure de l'ANFR incluant l'extrapolation aux valeurs maximales théoriques de champ tout en tenant compte des particularités de chaque système (intégré à la version V3 du protocole de mesures In-Situ).

=> Études du comportement de différents systèmes de mesure, couramment utilisés aujourd'hui (sondes large bande et analyseurs de spectre), soumis à des émissions apériodiques de WiFi, WIMAX et LTE.

Participation au conseil scientifique de l'étude Cochin relative aux personnes électro hypersensibles aux champs électromagnétiques (EHS)

Cette étude (GH COCHIN, INERIS, ANSES) vise à une prise en charge de patients présentant un syndrome d'Intolérance Environnementale Idiopathique attribuée aux Champs ÉlectroMagnétiques (IEI-CEM).
De plus en plus de personnes semblent gênées par les ondes et se déclarent Électro Hyper Sensibles (EHS), mais, jusqu'à présent aucune relation de cause à effet n'a pu être prouvée entre les symptômes et l'exposition. Cette étude va essayer de répondre à deux problématiques: comment diagnostiquer le syndrome et trouver des solutions permettant d'améliorer leur état de santé ou leur qualité de vie en réduisant leur sensibilité vis-à-vis des expositions aux champs EM. L'étude devrait durer 44 mois au total, elle accueillera environ 50 patients par an qui seront pris en charge dans 24 centres volontaires du Réseau National de Vigilance et de Prévention des Pathologies Professionnelles (RNV3P) en France.

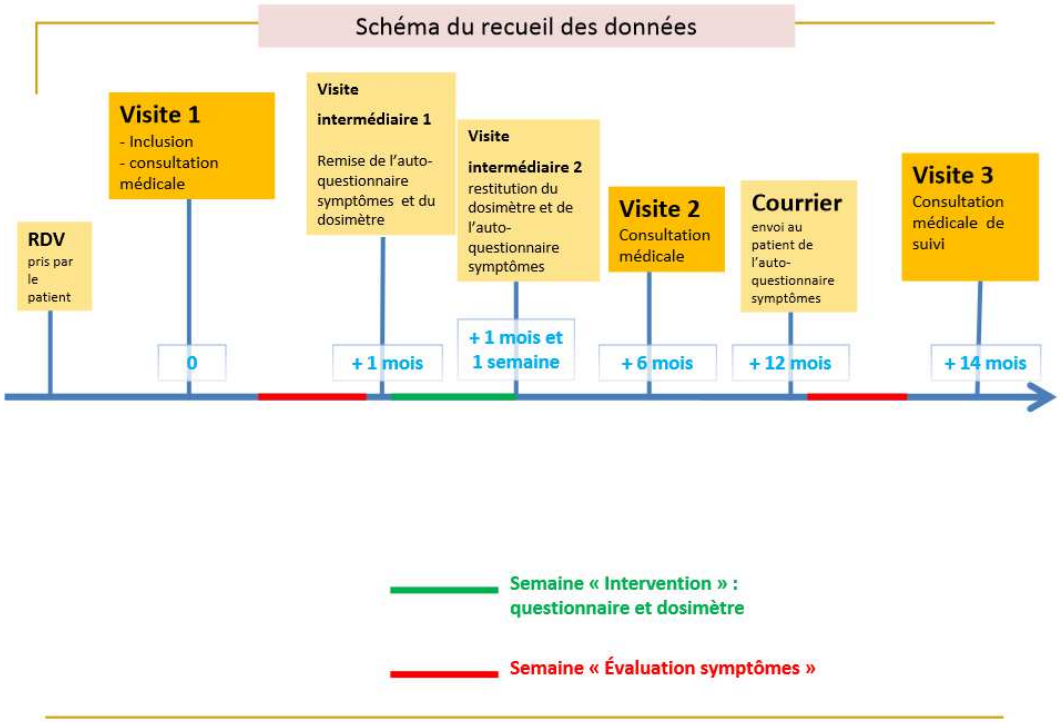


Figure 6-1 Protocole de prise en charge et suivi sur 14 mois des patients.

Un protocole national de prise en charge spécialisé des patients atteints d'IEI-CEM a été élaboré et un "Programme Hospitalier de Recherche Clinique" (PHRC) national a été proposé et accordé fin 2010 (fig. 6-1).

Travaux d'enseignement

Supélec, avec le soutien du conseil général de l'Essonne et de la région Ile de France, s'est équipé en matériel de pointe dans les domaines des Télécommunications et de la CEM à partir de 2003.

Les équipements ont été regroupés dans une plateforme commune à plusieurs Départements (Télécommunications et Électromagnétisme) nommée PTMS (Plateforme Télécommunications Multi Services). Elle comprend des équipements de génération de test et de mesure pour les signaux actuels et futurs ainsi que divers équipements grand public existants dans la vie courante. En tant que coresponsable de cette plateforme, je dois garantir son évolution et son bon fonctionnement pour rester au niveau des évolutions technologiques et pour pouvoir répondre aux différents besoins des enseignants-chercheurs et des élèves de l'école. Cette plateforme a permis de faire bénéficier les élèves ingénieurs et les stagiaires en formations continues de la pratique des nouvelles technologies.

Interventions en Formation Initiale en 3e année du cycle ingénieur:

L'enseignement en 3e année à Supélec est constitué pour moitié d'un enseignement spécifique de la majeure suivie (destiné à parfaire les connaissances de l'élève dans le domaine de spécialisation choisi) et pour moitié d'un enseignement complémentaire choisi parmi un ensemble d'unités d'enseignement dites mineures. Ces mineures peuvent être d'approfondissement dans le domaine de la majeure, d'ouverture vers d'autres domaines ou encore orientées métiers ou secteurs d'activités.

J'interviens dans deux majeures différentes:

- Tel: Majeure domaine des télécommunications,
- EC: Majeure domaine de l'électromagnétisme et des communications.

Cours majeure EC (1 cours):

- Compatibilité électromagnétique et Radioélectrique.

Cours de mineure Tel et EC (3 cours):

- Les technologies WLAN: WiFi, Bluetooth,
- Les systèmes de communications mobiles de 4e génération (WIMAX et LTE),
- L'évolution de la gestion du spectre radioélectrique.

Travaux de laboratoire en majeure EC :

- Compatibilité électromagnétique et radioélectrique.

Encadrement de projets de 1e, 2e et 3e année.

Interventions en Formation Continue

Cours de type inter ou intra entreprise dans les domaines de la CEM/CRE, de la mesure en RF, des nouvelles technologies de communications sans fil (WLAN, WMAN, 2G, 3G, 4G), sur les normes et services radioélectriques et sur les briques de bases (modulations, codages, techniques d'accès, etc.) utilisées dans les différentes normes de communications.

- Modulations numériques multi-porteuses OFDM (responsable de la session et intervenant: techniques et systèmes de communication numérique),
- Mesures en Radiofréquence (responsable de la session et intervenant: modulations et techniques d'accès, techniques de mesures radiofréquence),
- Bluetooth version 1.1 (responsable de la session et intervenant: Bluetooth IEEE802.15.1),
- Wifi et IEEE802.11 ? (responsable de la session et intervenant: WiFi IEEE802.11a/b/g/n/ac/ad/af),
- Bases de l'électronique (intervenant: Applications en électronique numérique),
- Transmission dans les réseaux locaux (intervenant: réseaux locaux sans fil),
- Réseaux locaux sans fil (intervenant: compatibilité électromagnétique, présentation pratique de solutions sans fil actuelles),
- Ultra Wide Band (intervenant: comparaison avec les systèmes sans fil existants),
- OFDM/CDMA/MC-CDMA (intervenant: technique de mesures en OFDM et en UMTS),
- Introduction aux antennes (intervenant: les antennes à la réception)
- Fondement de la compatibilité électromagnétique (intervenant: compatibilité électromagnétique),
- Mesure de champs en radiocommunication numériques (intervenant: techniques de mesures radiofréquence),
- Technique de mesure pour la télévision analogique et la télévision numérique terrestre (intervenant: la télévision numérique terrestre).

Les nouvelles normes de systèmes de communication radioélectrique

Cette annexe décrit quelques systèmes récents et futurs qui ont été mis en cause dans les chapitres précédents. Les documents ayant servi à cette rédaction proviennent tout d'abord des normes IEEE [IEEEa, b ,c, d], de plusieurs documents sur les techniques de modulations et de codages utilisées [MUR81, DUB06, FOE06, NUA07, CAR09, HOL09, RIE09, RUM09, WIG10, ETS12], mais aussi d'ouvrages plus généraux sur les systèmes de communications sans fil [RAP99, AGH01, PRO01, AGR02, BAU02, HAL02, HEI02 , MUL02]. Les documents suivants [MIT00, MAN04, COR06, MIT08, FCC10, LEK12] ont servi de références pour les systèmes à venir, basés sur la radio logicielle ou cognitive.

Normes IEEE802.11 "WiFi"

IEEE802.11b, a, g

La version b utilise un code de Barker pour l'étalement de spectre DSSS et la bande occupée est de ~20MHz.

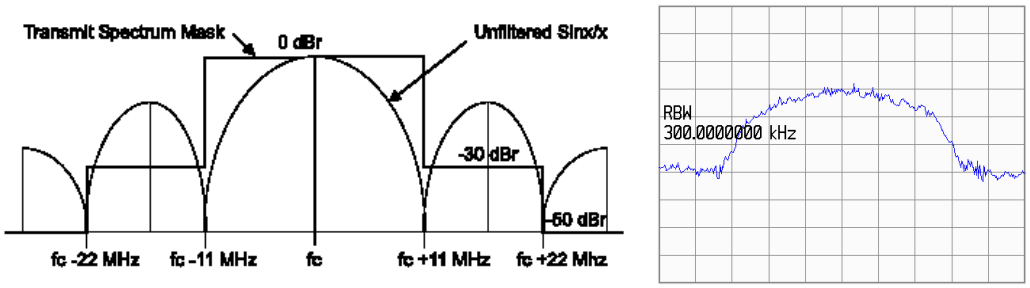


Figure 6-2 Masque théorique et spectre réel d'un signal WiFi b.

La bande de fréquence utilisée est la bande ISM entre 2,4 et 2,4835GHz, 14 canaux de 5MHz sont définis, mais seulement les 13 premiers canaux sont utilisables en France. Ce qui compte tenu de la largeur du spectre occupé par un système WiFi, seulement 3 canaux sont utilisables (sans interférence) à un endroit donné.
La version b introduit la modulation CCK qui permet d'obtenir des débits plus grands sans augmenter la bande occupée par le signal (rendement supérieur).

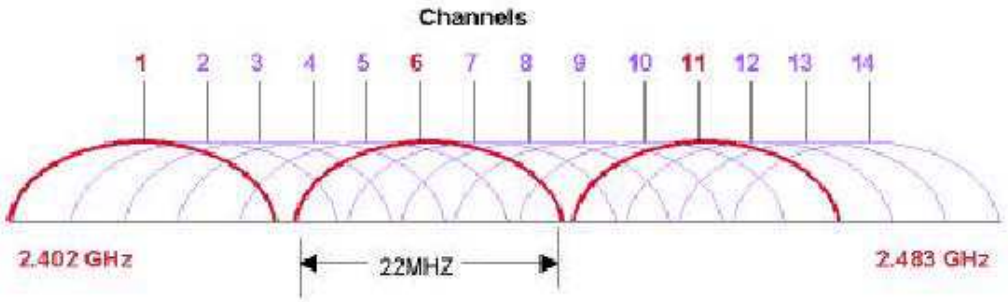


Figure 6-3 Utilisation de la bande ISM par les systèmes WiFi.

Les versions a et g sont assez semblables, elles utilisent la modulation OFDM avec 52 sous-porteuses dont 48 pour les datas (FFT 64) espacées de 312,5kHz.

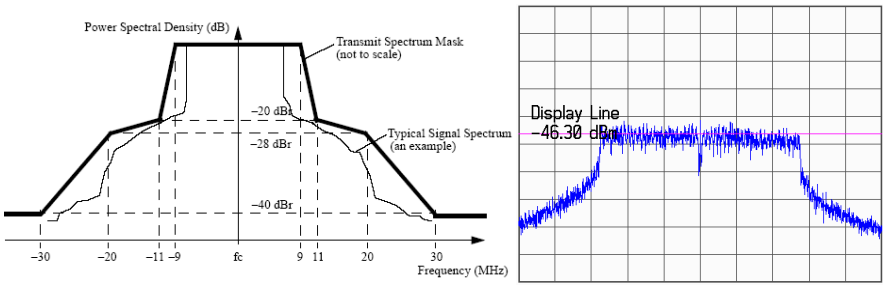


Figure 6-4 Masque théorique et spectre réel d'un signal WiFi g.

Les différences:

- Les bandes utilisées: ISM 2,45GHz pour la version g et UNII 5,2GHz pour la version a,
- Les temps intertrames et la taille des préambules des trames, la version g utilise les mêmes que la version a plus d'autres pour assurer la compatibilité avec les versions de base et la version b.

IEEE802.11n

La norme IEEE 802.11n (Septembre 2009) apporte des améliorations par rapport aux standards IEEE 802.11a/b/g et doit permettre d'atteindre un débit maximal théorique de l'ordre de 600 Mbit/s (au lieu de 54 MHz pour les versions a et g). Celle-ci peut être vue comme la convergence des versions 802.11a (bande UNII à 5,4 GHz) et 802.11g (bande ISM à 2,45 GHz). Cette norme reste compatible avec les anciennes versions et intègre des nouvelles technologies comme: MIMO, le "Beam Forming" (BF), la modulation OFDM/MAQ64, l'agrégation de plusieurs canaux de transmission et l'agrégation de paquets de données.

Les équipements WiFi utiliseront de préférence les canaux de fréquences dans la bande à 5,4 GHz pour des échanges de données à très haut débit, car la bande est moins utilisée par d'autres systèmes et aussi parce qu'il n'y a pas de recouvrement entre les différents canaux alloués, ceux-ci étant de 20 MHz de large pour une occupation de 20 MHz. La bande ISM à 2,45 GHz sera utilisée en complément de la bande haute et pour les échanges avec des systèmes WiFi anciens (mode de fonctionnement appelé "Legacy mode"). Les émissions pourront donc se faire sur une des bandes de fréquences ou sur les deux à la fois. La largeur du spectre occupé sera aussi variable, mais restera multiple de 20 MHz: soit 1x20 MHz, 2x20 MHz ou 1x40 MHz.

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) permet d'associer m antennes à l'émission à n antennes en réception: mxn (1x1 pour un système non MIMO). Cela permet à un système de pouvoir augmenter son débit, en parallélisant l'envoi de données, en utilisant des chemins ou flux de données indépendant, elle est parfois appelée SDM (Spatial Division Multiplexing). Le gain maximal pouvant être obtenu en transmission est de la plus petite valeur de m ou n (min(m,n)).

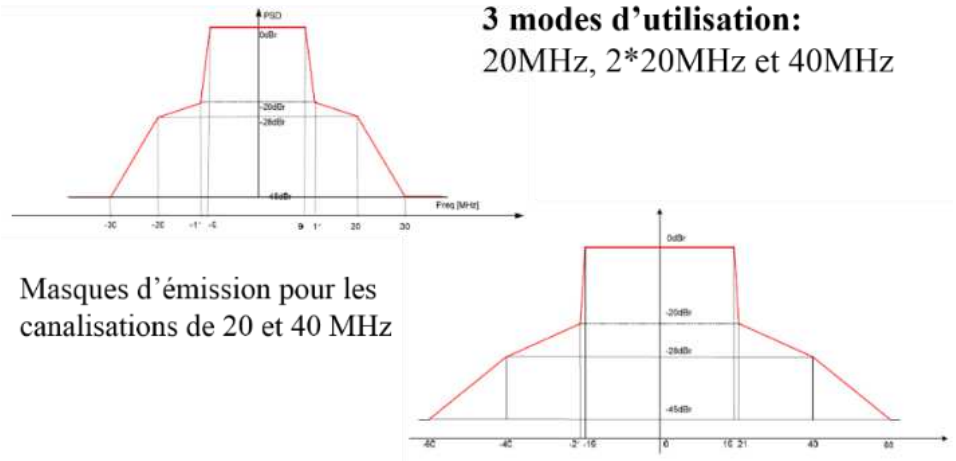


Figure 6-5 Masques d'émissions normalisés de WiFi n.

Point important: la valeur de la puissance totale rayonnée ou la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) émise par le système devant rester constante, cela implique que la puissance émise par chaque antenne doit être divisée par le nombre d'antennes d'émission (ISM à 2,45 GHz: 100 mW (20 dBm) et UNII à 5,4 GHz: 200 mW (23 dBm)).

MIMO permet aussi, lorsque les conditions ne permettent pas de faire du SDM, d'améliorer la transmission en faisant de la diversité si toutes les antennes émettent

les mêmes informations ou de modifier le diagramme d'émission du système en dirigeant le faisceau vers le récepteur : le BF.

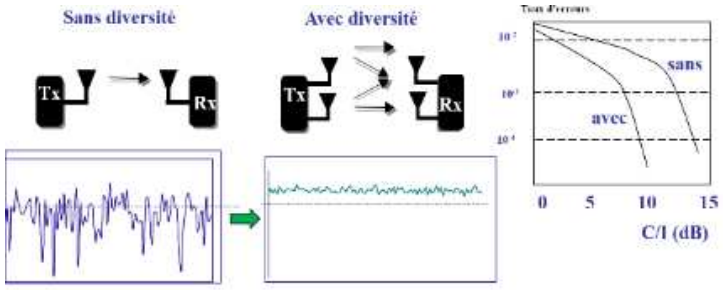


Figure 6-6 Effet du fading sur la puissance de réception avec et sans diversité.

L'ajout de nouveaux schémas de modulation et de codage (MCS) qui associe plus efficacement la modulation MAQ64 (6 bits par symboles transmis) et les codes correcteurs d'erreurs, en association avec l'agrégation de trames en super trames et l'agrégation de canaux de transmission permet une augmentation des débits utiles pouvant aller jusqu'à 150 Mbps par flux, soit 600 Mbps avec MIMO 4x4.

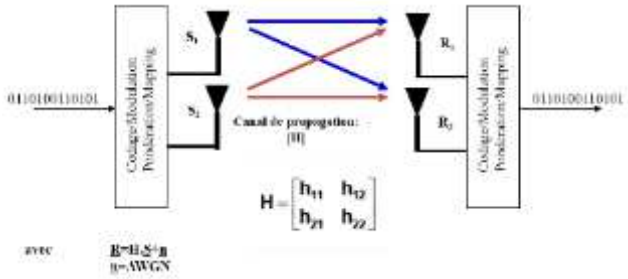


Figure 6-7 Principe de fonctionnement de MIMO.

IEEE802.11ac, ad, af

Nouvelle évolution prévue de la norme WiFi IEEE802.11ac utilisera la bande UNII à 5,4 GHz et devra assurer la compatibilité avec les versions 802.11a et 802.11n, mais pas avec les versions 802.11b et 802.11g. L'efficacité spectrale et les caractéristiques ont été augmentées par rapport à la version n pour répondre à la demande croissante de débit, le débit maximal théorique offert serait de l'ordre de 1 Gbps. Pour cela, de nouvelles valeurs de canaux ont été définies: 80 et 160 MHz, les schémas de codages ont été améliorés avec des modulations de type MAQ256 (8 bits par symboles transmis) et le nombre de flux indépendant utilisable peut aller jusqu'à 8 (MIMO 8x8). Deux autres techniques apparaissent dans cette norme: une technique d'accès à la ressource radio appelée SDMA (Space Division Multiple Access) qui permettra de

séparer spatialement plusieurs utilisateurs en utilisant le BF et le MU-MIMO (Multi User MIMO) qui pourra séparer des utilisateurs sur des flux différents en lui associant un certain nombre d'antennes.

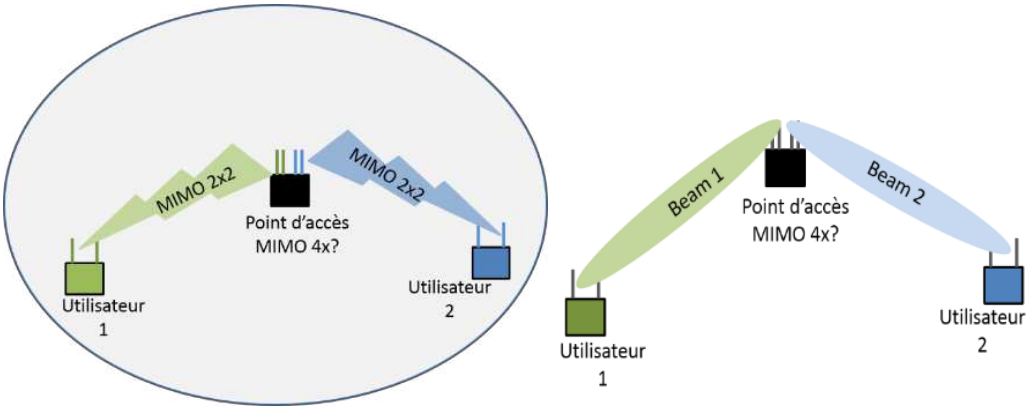


Figure 6-8 Deux techniques de "space time coding" ; MU-MIMO (muti user MIMO) vs SDMA (Space Division Multiple Access).

La norme 802.11ad introduit de grandes modifications dans le protocole tant au niveau de la couche d'accès (MAC) qu'au niveau de la couche physique (PHY) par l'utilisation d'une troisième bande de fréquences: celle dite "à 60 GHz" (typiquement entre 57 et 66 GHz). L'utilisation du 60 GHz facilite la technique du BF et permet l'utilisation de plusieurs canaux de grande largeur, 3 canaux possibles de 1,88 GHz). Les débits maximaux théoriques annoncés sont supérieurs au 1Gbps par flux "MIMO".

Les bandes de fréquences à 2,45 et 5,4 GHz peuvent servir à la transmission de trames de données, mais aussi à assister les communications en 60 GHz en assurant le transport des trames de contrôle pour cette liaison.
La technique du BF permet aussi d'accroître la portée du 60 GHz en concentrant la puissance dans une direction pour compenser les pertes de propagation qui augmentent avec la fréquence utilisée. La PIRE prévue pour l'Europe sera de 47 dBm (50 W).

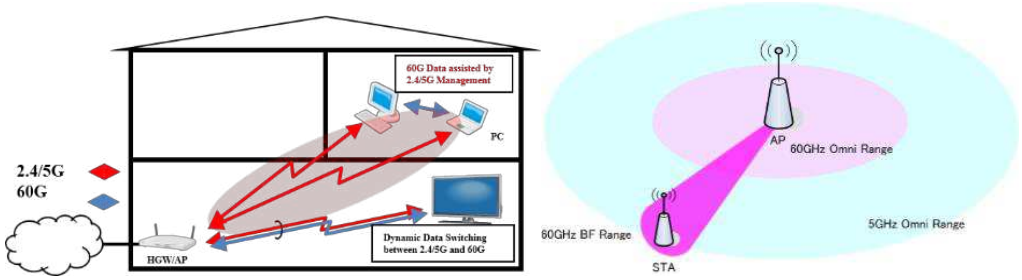


Figure 6-9 Deux exemples permettant aux 2,45 et 5,4 GHz d'aider le 60 GHz.

Tableau 4: Différentes évolutions de la norme 802.11.

Version	Fréquences (GHz)	Canal max (MHz)	Modulations	Débit théorique max (Mbps)	Nombre de flux MIMO
802.11a	5,4 (3,7 ?)	20	OFDM	54 (*x)	x=1
802.11b	2,45	20	DSSS/CCK	11 (*x)	x=1
802.11g/p	2,45 / 5,7	20	DSSS/CCK; OFDM	54 (*x)	x=1
802.11n	2,45; 5,4	20; 40	OFDM	150 (*x)	x=4
802.11ac (draft)	5,4	20; 40; 80; 160	OFDM	860 (*x)	x=8
802.11ad (draft)	60 (2,45; 5,4)	1880	OFDM	~6800 (*x)	x=1 ?
802.11af (draft)	"TV White space"	5; 10; 20; 40	OFDM	54 (*x)	x=1 ?

Autres évolutions des normes de la famille WiFi:

IEEE 802.11y: extension de la norme 802.11a pour une possible utilisation dans la bande avec licence à 3,7 GHz, qui permettrait d'étendre la portée des communications jusqu'à 5 km en augmentant la PIRE du système.
IEEE 802.11aa: Version renforcée et optimisée de la norme pour répondre aux contraintes de transport des flux de streaming Audio/Vidéo.
IEEE 802.11ae: Version qui permet de mieux gérer la QoS.
IEEE 802.11af: version de type "cognitive radio", optimisée pour "TV *White Space": voir White Space*.
IEEE 802.11ah: Modification pour des utilisations dans des bandes de fréquences <1 GHz.
IEEE 802.11ai: Fast Initial Link Setup.
…

Normes IEEE802.16 « WIMAX »

WIMAX: "Worldwide Interoperability for Microwave Access" ou IEEE802.16 représente une famille de standard de réseaux sans fil comme WiFi. WIMAX utilise une grande variété de bandes de fréquences comprises entre 2 et 66 GHz

(voir tableau ci-dessous) suivant le pays dans lequel sera déployé le système et la version de la norme utilisée.
WIMAX est une technologie radio de type cellulaire point à multipoint pour des usages fixes ou mobiles pouvant offrir des débits de plusieurs dizaines de Mbps dans des réseaux de types métropolitains (MAN).

Les différentes versions et évolutions du standard IEEE802.16 se déclinent en deux grandes catégories:
Le WIMAX fixe, connu sous le nom de protocole IEEE802.16-2004, cette norme permet d'avoir une connexion internet haut débit à domicile en remplacement de l'ancienne boucle locale radio (BLR). La technologie 802.16-2004 utilise les bandes de fréquences allant de 2 à 11 GHz (2.5 GHz et 3.5 GHz, bande demandant une licence d'exploitation et possible à 5.8 GHz, bande libre). Le débit théorique maximal est de 75 Mbps avec une portée de 10 km. Le WIMAX fixe est une alternative à l'ADSL ou au Câble, et peut se voir très utile pour les personnes n'habitant pas dans des zones couvertes ou trop loin des concentrateurs.

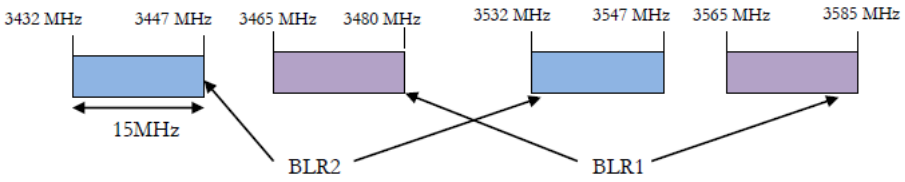


Figure 6-10 Bandes de fréquences dédiées pour le WIMAX fixe.

Le WIMAX mobile, norme IEEE802.16e ou 802.16-2005, technologie comparable et concurrente de LTE qui devait faire suite à la 3e génération de la téléphonie mobile (l'UMTS) et préparer à la future 4g, n'a pas su s'imposer (système non utilisé, voir abandonné par les opérateurs de téléphonie mobile et par la plupart des industriels au profit de LTE). Cette norme sortie en septembre 2004 utilise les bandes de fréquence allant de 2 à 6 GHz (2500-2690 MHz), elle permet en pratique de se connecter en haut débits en se déplaçant a moins de 122 km/h, le tout avec des débits montants et descendants de l'ordre de 30 Mbps, en revanche la portée de celui-ci serait réduite à environ 3,5 km maximale, il faudrait donc passer d'un réseau à l'autre afin de ne pas subir de déconnexion.
Cette norme est totalement compatible avec le WIMAX fixe puisqu'elle offre une interopérabilité entre les plates-formes fixes et les plates-formes mobiles.
Une autre version de WIMAX: IEEE802.16m ou WIMAX Gigabit a été défini pour répondre au cahier des charges de la 4e génération de la téléphonie mobile et tente de s'imposer face à la norme concurrente LTE-Advanced.

Tableau 5: Récapitulatif des différentes versions du standard IEEE802.16.

Standard	Description	Publié	Statut
IEEE std 802.16-2001	définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz (jusqu'à 66 GHz)	8 avril 2002	obsolètes
IEEE std 802.16c-2002	définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003	
IEEE std 802.16**a**-2003	amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.	1er avril 2003	
IEEE std 802.16-2004 (également désigné IEEE802.16**d**)	il s'agit de l'actualisation (la révision) des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.	1er octobre 2004	obsolète/actif
IEEE802.16**e** (également désigné IEEE std 802.16e-2005)	apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard, jusqu'à 122 km/h.	7 décembre 2005	actifs
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC (Media Access Control) et PHY (Physical)	22 janvier 2006	

Les principales caractéristiques de WIMAX pour la couche physique sont:
L'émission radio se fait sous la forme d'un « burst » variable en fonction de la QoS demandée (schéma de codage et de modulation adopté) et de l'environnement => "Adaptibilité".
Elle intègre un mécanisme de correction d'erreurs: Le FEC (Field Error Correction).
La norme de base définit des trames, qui sont composées de slots, dont les durées sont variables (0.5, 1, 2, … ms). Elle supporte les deux modes de duplexage (TDD et FDD).

Largeur de bande	1,25 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz
Espacement inter-porteuse	10,94 kHz	10,94 kHz	10,94 kHz	10,94 kHz
Fréquence d'échantillonnage	4 MHz	8 MHz	16 MHz	32 MHz
Taille de la FFT	128	512	1024	2048
Nb de sous-porteuses pour les données	76	360	720	1440
Nb de sous-porteuses pilotes	12	60	120	240
Nb de sous-porteuses nulle ou de garde	44	92	184	368
Nb de symboles OFDM par trame de 5 μs	48	48	48	48
Durée d'un symbole OFDM	102,9 μs	102,9 μs	102,9 μs	102,9 μs

Figure 6-11 Exemples de valeur de paramètres en fonction de la largeur du canal utilisé.

WIMAX, comme la plupart des systèmes utilisant l'OFDMA comme technique d'accès (LTE), dispose de deux types de représentation temporelle et fréquentielle correspondants aux deux sens de duplexage: le SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour la voie montante (UL) et l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour la voie descendante (DL). Ce choix est dû à deux problèmes liés à l'utilisation de la modulation multi porteuses OFDM:

- La modulation OFDM à un PAPR ou CF grand (jusqu'à 20dB), même avec l'utilisation de techniques de réduction, entrainant l'utilisation d'un amplificateur de forte puissance (pour rester en zone de fonctionnement linéaire) par rapport à la valeur de la valeur moyenne du signal émis (exemple: si P_{RMS}=2W et CF=13dB => P_{ampli}=20W). Une conséquence immédiate: la taille de la batterie augmente avec la consommation, ce qui est très problématique pour un terminal mobile.
- L'OFDMA est une technique de modulation et d'accès, qui partage de la ressource en temps (slots) et en fréquences (sous-porteuses) entre divers utilisateurs, il faut donc que les récepteurs disposent d'un système de synchronisation très performant, très complexe et donc gourmand en énergie.

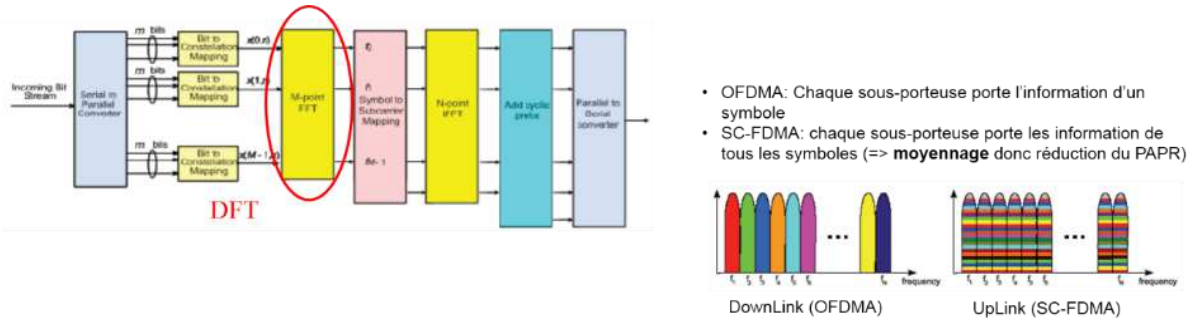


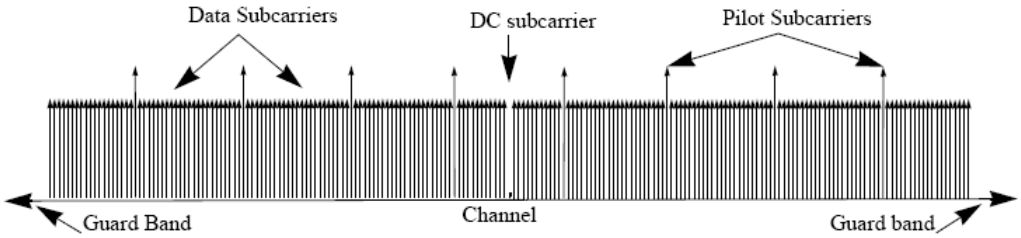
Figure 6-12 Les deux types de modulations utilisées par WIMAX.

Le SC-FDMA a donc été choisi pour le sens montant (du mobile vers la station de base), car il ressemble à la technologie W-CDMA avec CF très élevé (CF de l'ordre de quelques dB), la synchronisation des signaux provenant des divers utilisateurs est plus simple et surtout le passage OFDM/SC-FDM se fait par ajout d'un simple module de calcul de FFT (DFT sur la figure 6-10) avant le calcul de l'OFDM.

Liste des paramètres clés pour la version IEEE802.16-2004:

- Channel bandwidth BW 1.25 MHz to 28 MHz,
- Sampling factor n 8/7, 86/75, 144/125 (316/275, 57/50),
- Sampling frequency F_S n*BW: 1.72 MHz to 32 MHz,

- FFT size N_{FFT} 256,
- N° of used sub carrier N_{used} 200,
- Sub carrier spacing Df F_S / N_{FFT}.
- Useful symbol time T_b 1 / Df,
- Cyclic prefix (CP) time T_g G * T_b,
- Guard period ratio G 1/4, 1/8, 1/16, 1/32,
- OFDMA symbol time T_s T_b+ T_g=(1+G)*Tb,
- Pilot carriers ±13, ±38, ±63, ±88,
- Guard subcarriers N_{Guard} 28 left/ 27 right.



- FFT sur 256 points,
- 200 sous-porteuses réellement utilisées,
- Dont 8 sous-porteuses pour les pilots,
- 28 porteuses de gardes à gauche et 27 à droite,
- Largeur du canal: 1,25 et 28 MHz.

Apport de la version pour mobiles IEEE802.16e (Scalable OFDMA):

- Largeur du canal variable entre 1,25 et 20 MHz,
- Espacement fixe entre porteuses
- Taille de FFT variable 128, 512, 1024
- Structure de sous canalisation variable
- Nouveaux schémas de modulation et de codage (AMC: Adaptative Modulation Coding)
- H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat Request)
- Utilisation de la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output)
- Utilisation de la diversité (AAS: Advanced Antenna System)

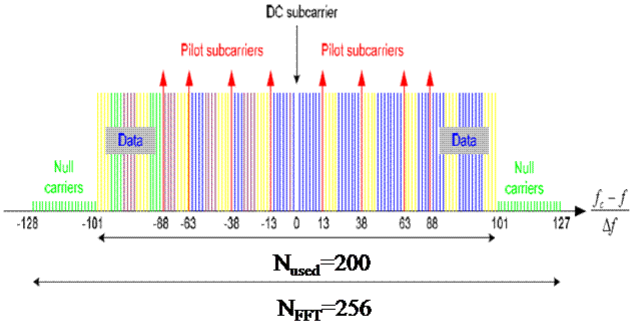


Figure 6-13 Utilisation des différentes sous-porteuses pour le mode OFDMA.

Des modulations différentes sont utilisées pour chaque sous-porteuse (Data, Pilots).

Table 182—Modulations supported

Modulation	Support (M=Mandatory, O=Optional)	
	UL	DL
Spread BPSK	M	M
BPSK	M	M
QPSK	M	M
16-QAM	M	M
64-QAM	M	M
256-QAM	O	O

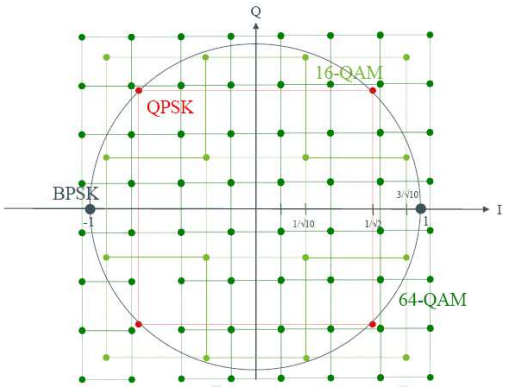


Figure 6-14 Les différents types de modulation utilisés et constellation correspondant aux différentes modulations.

Structure des trames pour WIMAX:

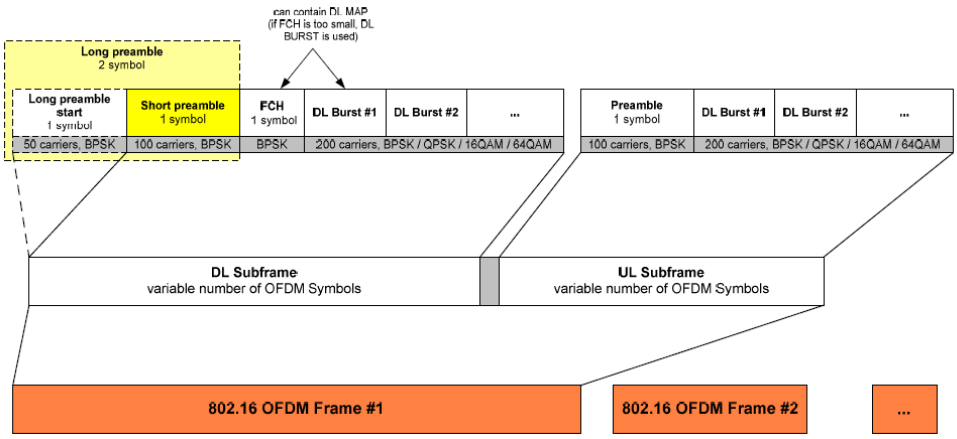


Figure 6-15 Exemple de structure de trame pour WIMAX Fixe (OFDM) en mode TDD format.

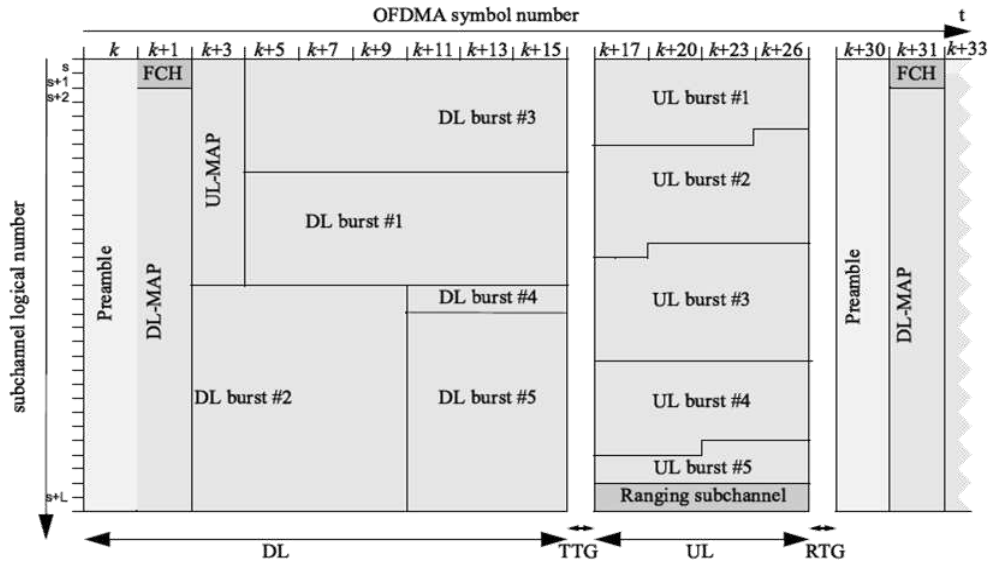


Figure 6-16 Exemple de structure de trame pour WIMAX mobile (OFDMA) en mode TDD.

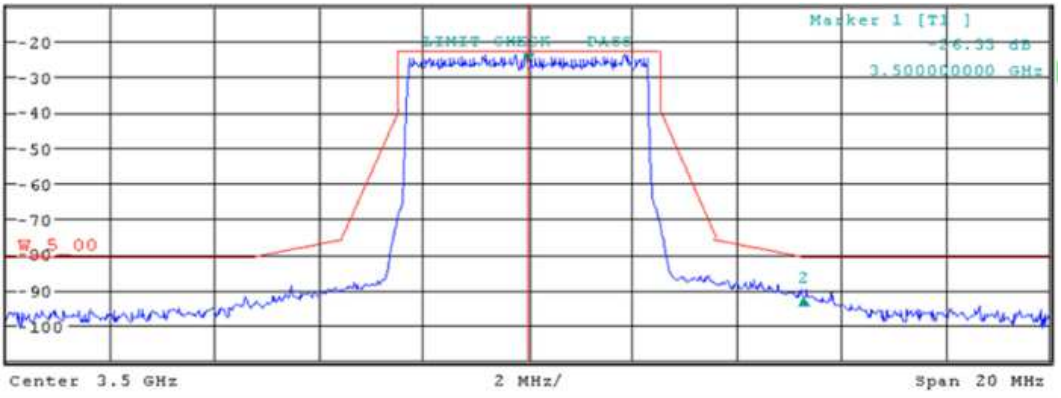


Figure 6-17 Exemple de spectre obtenu et d'un masque d'émission pour un signal utilisant un canal de 5MHz.

Long Term Evolution

LTE/SAE: "*Long Term Evolution / System Architecture Evolution"* est le nom de projet de la dernière évolution du système 3GPP UMTS, comprenant de nombreuses modifications et améliorations de la qualité de service offert aux utilisateurs (notamment en termes de débit et de mobilité). Cette nouvelle technologie de téléphonie mobile doit être vue comme une transition entre les technologies "3G" ou "3G+" et comme le futur de la technologie dans les

prochaines années. Pour cette raison, on dit souvent du LTE que c'est une technologie "pré-4G" ou encore "3.9G" selon la terminologie.

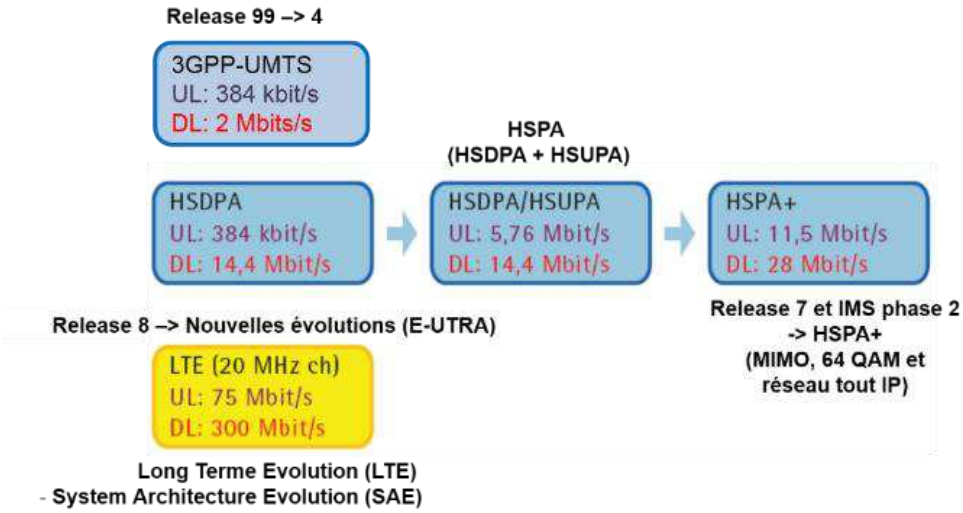


Figure 6-18 Évolution des spécifications du système 3GPP, l'UMTS, vers LTE.

Performances cibles pour LTE:

- débit maximum instantané pour le sens DownLink (DL) de 100 Mbps pour une bande utilisée de 20 MHz (5bps/Hz) et jusqu'à 326 Mbps max (300 Mbit/s utiles) en mode MIMO 4X4,
- débit maximum instantané UpLink (UL) de 50 Mbps pour une bande utilisée de 20 MHz (2,5 bps/Hz) et jusqu'à 86 Mbps max en mode MIMO 4x4,

Tableau 6: Exemple de débit théorique LTE en fonction du nombre d'antennes.

Table 14: LTE Peak Throughput Rates

LTE Configuration	Downlink (Mbps) Peak Data Rate	Uplink (Mbps) Peak Data Rate
Using 2X2 MIMO in the Downlink and 16 QAM in the Uplink	172.8	57.6
Using 4X4 MIMO in the Downlink and 64 QAM in the Uplink	326.4	86.4

- temps de transition entre un état d'attente et un état actif < 100 ms, temps de transition entre un état "dormant" et un état actif < 50 ms et temps de service < 5ms pour des petits paquets IP,
- support de plus de 200 utilisateurs "actifs" dans une cellule,
- une large gamme de bandes de fréquences hertziennes supportées, y compris celles utilisées par la 2g et la 3g plus de nouvelles bandes à

800MHz (dividende numérique) et à 2,6 GHz (dont 19 en LTE FDD et 8 en LTE TDD). La possibilité d'utiliser des sous-bandes de fréquences non contiguës,

- l'utilisation de l'OFDMA pour le sens DL et du SC-FDMA pour le sens UL qui permet de réduire le facteur de crête à l'émission (augmentation de la durée de vie des batteries) et facilite la synchronisation des mobiles,
- amélioration des performances et des débits radios par l'utilisation (optionnelle) de la technologie multi antennes MIMO,
- débit utile moyen par utilisateur en Downlink de 3 à 4 fois supérieur à la release 6 HSDPA,
- débit utile moyen par utilisateur en Uplink 2 à 3 fois supérieur à la release 6 Enhanced Uplink,
- efficacité spectrale en Downlink cible (b/s/Hz) 3 à 4 fois supérieure à la release 6 HSDPA,
- efficacité spectrale en Uplink cible (b/s/Hz) 2 à 3 fois supérieure à la release 6 Enhanced Uplink,
- optimisation du réseau de cœur E-UTRAN pour des vitesses < 15 km/h, bonnes performances de E-UTRAN pour des vitesses < 15 km/h - 120 km/h > et maintien de la connexion pour des vitesses < 120 km/h – 350 km/h > (500 km/h sous certaines conditions),
- maintien du débit, de l'efficacité spectrale et de la mobilité pour des cellules de 5 km de rayon,
- faible dégradation des performances jusqu'à 30 km et possibilité d'une extension à 100 km,
- réseau E-UTRAN autorise l'utilisation de plusieurs largeurs de bandes de fréquences (1,25 ; 2,5 ; 5 ; 10 ; 15 et 20 MHz),
- cohabitation sur un même lieu avec GERAN/UTRAN (ancien réseau de cœur) dans des bandes adjacentes,
- support d'opérations terminales, de mesures et de handover UTRAN/GERAN (<300 ms),
- une seule architecture E-UTRAN définie (contrairement aux cinq architectures prévues pour l'UMTS),
- architecture E-UTRAN basée sur l'échange de paquets (réseau tout IP), supporte le temps réel et la classe de trafic "conversationnelle",
- minimise la présence d'un point de rupture,
- supporte la QoS de bout en bout,
- support efficace pour les transmissions venant des couches hautes,
- réduction de la complexité (moins d'options et de caractéristiques),
- cinq classes de terminaux ont été définies, elles supportent des débits de 10 Mbps (catégorie 1), jusqu'au débit maximal prévu par la norme soit 300 Mbps (catégorie 5) et doivent être compatibles avec les largeurs de bandes de fréquences.

Déploiement du LTE

Le passage de l'analogique au numérique de la télévision a dégagé des bandes/canaux de fréquences grâce à une meilleure efficacité spectrale pour la Télévision Numérique Terrestre (TNT), les canaux de 8 MHz utilisés aujourd'hui permettent de diffuser entre 4 et 6 chaînes (multiplexes numériques) au lieu d'une pour l'analogique tout en offrant une meilleure QoS (service data et HD).

La ressource/bande de fréquences ainsi libérée pour les applications de télécommunications mobiles s'appelle le dividende numérique (première phase). Ces fréquences sont très intéressantes pour les télécommunications mobiles, car elles permettent de répondre au besoin croissant de débit et comme elles sont de fréquences plus petites (comparativement à celles utilisées couramment: 900 et 1800 MHz en GSM et 2100 MHz en UMTS) elles permettent d'assurer une meilleure couverture du territoire en ville (intérieur des bâtiments) et en zone rurale (portée plus importante).

La standardisation du LTE par le 3GPP a été achevée au début de l'année 2008. Le déploiement du LTE a déjà débuté dans de nombreux pays (notamment aux États-Unis) et a débuté en France fin 2012 dans quelques grandes villes. En France deux bandes de fréquences (ARCEP mai 2011), utilisables par les systèmes dits 4G (LTE), ont été concédées sous forme de licences aux opérateurs souhaitant développer un futur réseau LTE.
En septembre 2011, les différents opérateurs français ont candidaté pour se voir attribuer les 14 lots de slots de 5 MHz dans les bandes 2500-2690 MHz pour le mode de duplexage fréquentiel (FDD) DL: 2500-2570 MHz et UL: 2620-2690MHz ou pour le duplexage temporel (TDD) 2570-2620 MHz.

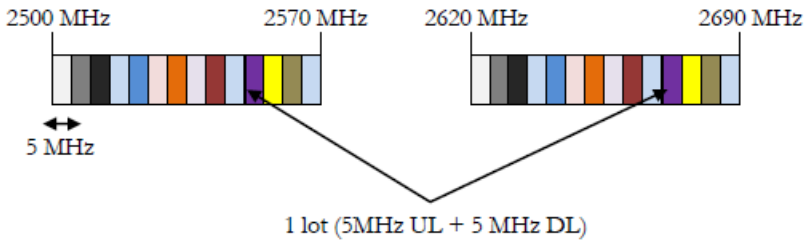


Figure 6-19 Répartition des 14 blocs duplex de 5MHz dans la bande 2500-2690MHz.

Bande LTE à 2,6 GHz FDD

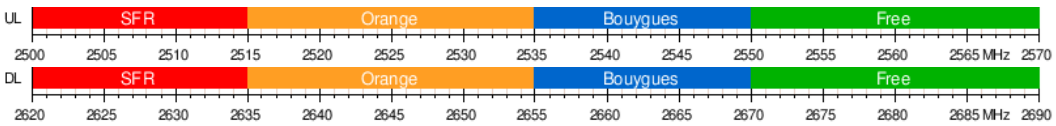


Figure 6-20 Allocation des bandes fréquences aux opérateurs de téléphonie en France.

En décembre 2011, les mêmes opérateurs ont candidaté pour se voir attribuer des lots de fréquences dans la bande 791-862 MHz (dividende numérique) pour le mode de duplexage fréquentiel (FDD) DL: 791-821 MHz et UL: 832-862 MHz, espacement duplex de 41 MHz.

Bande LTE à 800 MHz FDD

Figure 6-21 Allocation de la bande duplex correspondant au dividende numérique.

Cette dernière bande est plus attractive que la première pour les opérateurs de téléphonie mobile, car l'utilisation de ces fréquences permet une plus longue portée et une pénétration accrue dans les bâtiments.

La norme LTE définit deux modes de séparation des voix descendante (DL: de la station de base BS vers les mobiles MS) et montante (UL: des mobiles MS vers la station de base BS) appelés duplexage: le mode appairé FDD (*Frequency Division Duplex*) et non-appairé TDD *Time Division Duplex*).

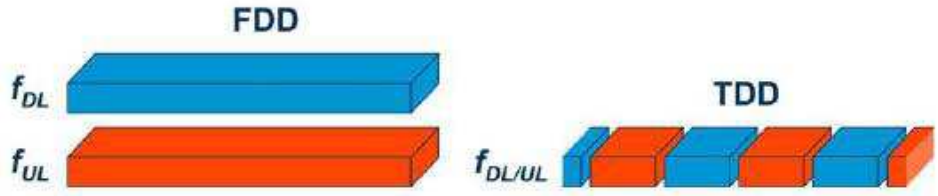


Figure 6-22 Les deux modes de duplexage (sens DL en bleu et sens UL en rouge).

Le mode le plus répandu est le mode FDD, le mode TDD restant un complément. Le mode TDD demandant 20% de stations de bases en plus pour couvrir une même zone si DL/UL = 3/1 (3x de ressources en DL).

La plus petite entité (ressource) allouée à un utilisateur par le système OFDMA s'appelle un Resource Block (RB), il comprend un lot "temps/fréquence" de 12 sous-porteuses consécutives (domaine spectral: 12x15 kHz soit 180 kHz) pendant la durée d'un slot (partie temporelle: 7 symboles OFDM soit 0,5 ms).

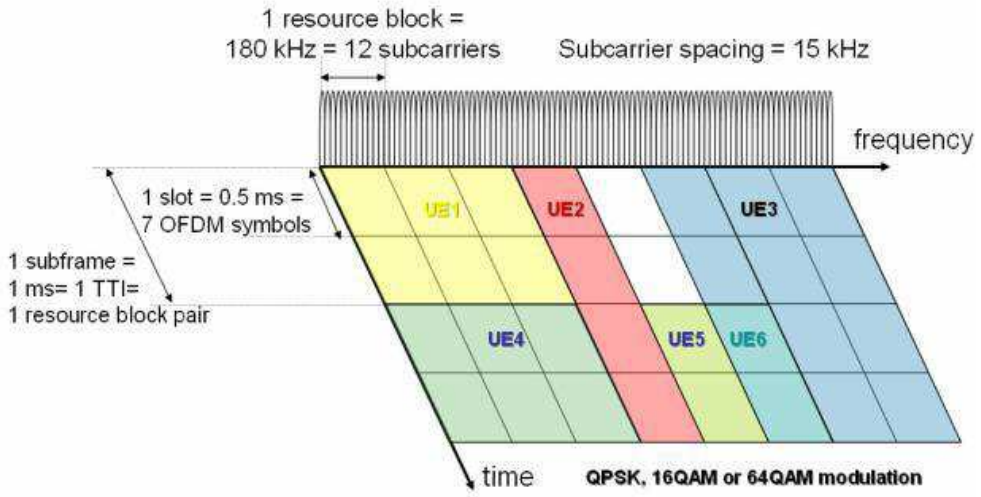


Figure 6-23 Exemple d'allocation de la ressource (temps/fréquence) à des utilisateurs.

LTE-Advance

La prochaine évolution de LTE sera un réseau mobile de 4^{e} génération (4G), faisant partie des technologies réseau retenues pour entrer dans le pool IMT-Advanced (avec le Gigabit WIMAX) représentant la "vraie" 4G. Premier véritable réseau 4G, LTE-Advanced devra être capable de fournir des débits de 1 Gbps à l'arrêt et de 100 Mbps en mouvement grâce à des technologies réseau intelligentes qui permettront de maintenir les débits en tout point de la cellule (alors qu'ils s'effondrent en bordure de cellule actuellement).

"White space" et "Cognitive Radio"

La ressource radio (les fréquences) étant rare et chère, les systèmes de communication modernes utilisent des technologies de plus en plus performantes pour le codage et la modulation des informations transmises, le rapport entre la bande occupée et le débit (efficacité spectrale) peut atteindre 10 et plus. Malgré cela, à cause du besoin croissant en débit, les opérateurs recherchent encore des bandes "libres". Du fait de la modernisation de certains services, du passage de la TV analogique à la TNT par exemple, des bandes vont pouvoir être récupérées voir inutilisées. Une partie peut-être réallouée à un autre service (cf. dividende numérique: bande donnée pour la 4G), mais d'autres, utilisées pour offrir une couverture de service primaire globale, peuvent être localement inutilisées. Les espaces blancs ou "White Space" sont des fréquences libres localement ou à un certain moment de la journée qui

pourraient potentiellement être utilisées par un autre service qui serait dit secondaire. Les challenges pour ces services secondaires sont de pouvoir fonctionner sans jamais interférer avec les services primaires et de pouvoir détecter quand et sur quelles fréquences ils peuvent émettre. Il leurs faudra donc intégrer des capacités de mesures et de reconfigurations rapides, de telles techniques ont été développées dans le cadre de la "radio logicielle" (Sofware Defined Radio) ou "radio cognitive" (Cognitive Radio). La mesure est primordiale, car le système secondaire doit s'assurer que le système primaire n'est pas actif, c'est-à-dire que les seuils de détection de puissance doivent être inférieurs au seuil de sensibilité du système primaire, elle doit se faire localement (sur les terminaux), mais doit être prise en compte globalement au niveau du réseau (stations de base). On appelle cette technique le "Geographic Sensing". Les systèmes doivent pouvoir se reconfigurer au niveau des codages et des modulations, mais aussi au niveau de la bande occupée et de la fréquence du canal choisie pouvant entraîner des problèmes de filtrage et d'antenne. Deux systèmes actuellement en cours de standardisation pour répondre à des besoins de type WLAN ou WMAN: IEEE802.11af et IEEE802.22 devraient travailler dans les bandes "libres" au sein des services de télédiffusions (54-862 MHz) appelés "TV White Space".

La norme 802.11af

Appelée aussi "Super WiFi" ou encore "White-Fi" décrit comment un système WiFi de courte ou moyenne portée (WLAN) peut utiliser une partie du spectre, non occupé localement, dédié à un service sans introduire de problèmes de compatibilité. Les bandes visées sont les fréquences libérées par le changement des systèmes de télédiffusion: de la TV analogique vers la TNT (entre 54 et 862 MHz), pas seulement le dividende numérique, réservé aux communications avec des mobiles, mais les espaces laissés libres entre les canaux TNT). Pour cela de nouvelles fonctions dites "cognitives" qui permettent de trouver des espaces "libres" ("geographic sensing"), d'opportunisme et d'agilité pour la prise en compte des changements ont dû être prises en compte. Le débit maximal théorique visé serait de 500 Mbps voire jusqu'à 1 Gbps, les bandes de fréquences utilisées devront prendre en compte la canalisation du système primaire (6, 7 ou 8 MHz pour la TNT) plusieurs largeurs de bandes contiguës ou non contiguës sont prévues. Le projet de norme prévoit deux types d'utilisation.

Tableau 7: Utilisations prévisionnelles du *White Space.*

Utilisation	Type	Portée maximale	PIRE
en intérieur (*indoor*)	WLAN	<100 m	20 dBm (100 mW) ou 17 dBm (50 mW)
en extérieur (*outdoor)*	WMAN	5 km	36 dBm (4 Wm)

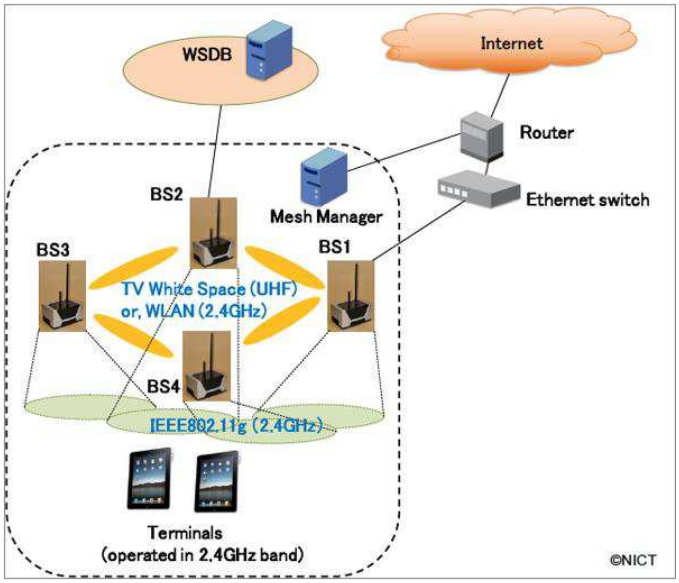


Figure 6-24 Architecture du standard IEEE 802.11af.

Caractéristiques principales:

- Utilisation de l'OFDM
- Tailles de la FFT (nombre de sous-porteuses max): 64, 128, 256 et en option 512 et 1024
- Largeurs de canal utiles: 5, 10, 20MHz voir 40 et 80MHz
- Modulations utilisées pour les données: BPSK (pilots), QPSK, MAQ16 et MAQ64
- Protocole MAC pour l'accès à la ressource: CSMA/CA (WiFi)

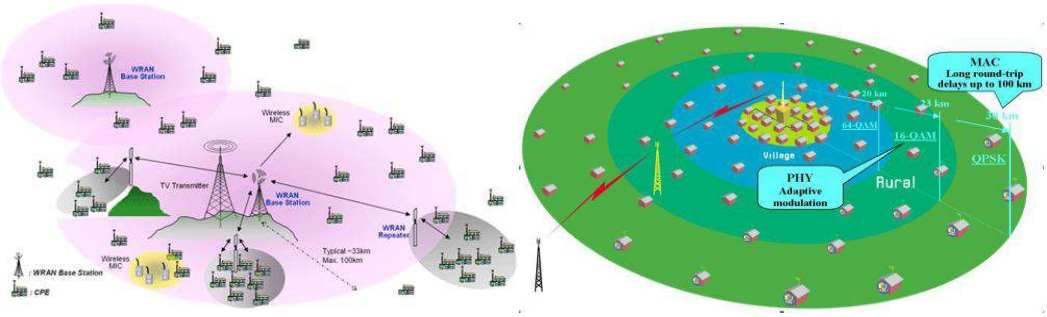


Figure 6-25 Architecture du standard IEEE 802.22.

IEEE802.22

C'est le premier standard pour systèmes sans fil basé sur la radio cognitive (Cognitive Radio: mesures, gestion dynamique du spectre, coexistence intra-système, géolocalisation et sécurité) permettant l'utilisation de bandes de fréquences réservées à la télédiffusion non utilisées (TV White Space ; entre 54 et 862 MHz) par un système de communication sans licence et cela sans interférer avec le système primaire. Le standard prévoit l'utilisation probable de 280 MHz dans les bandes VHF et UHF (soit 47 canaux TV de 6 MHz) en point to multipoint (PMP) d'une portée entre 17 et 33 km ainsi que le support de la mobilité jusqu'à 110 km/h. Deux types d'équipements sont décrits: les stations de base (Base Station: BS) et les équipements fixes ou mobiles d'un abonné (Customer Premise Equipment: CPE).
La puissance émise (PIRE) par un CPE sera de 36 dBm (4 W) à l'aide d'une antenne de grand gain (14 dBi) pour réduire au maximum les interférences avec les autres systèmes et il faudra un système GPS ainsi qu'une autre antenne omnidirectionnelle pour la localisation et le "Sensing".

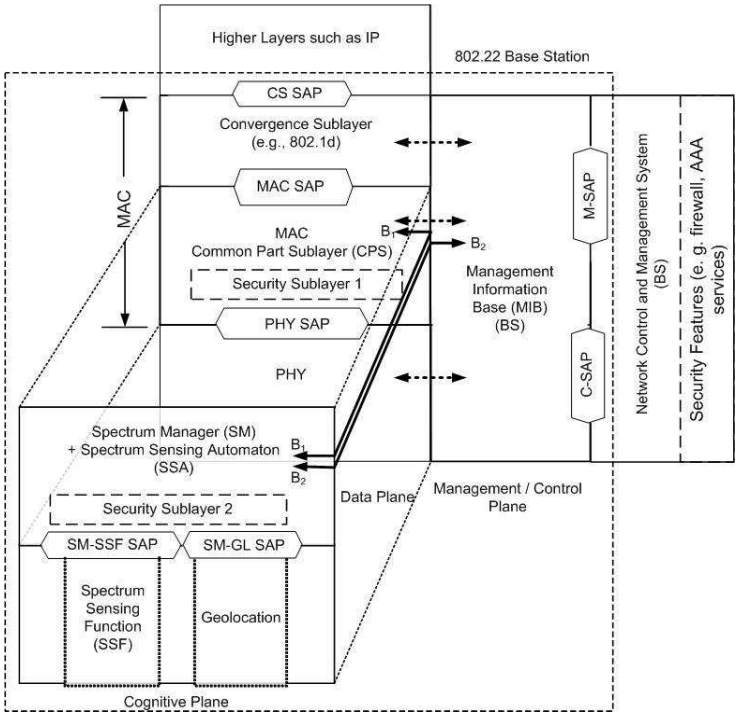


Figure 6-26 Les principales composantes définies du standard IEEE 802.22.

La technique de duplexage utilisée est le mode TDD (Time Division Duplex), partage du canal entre la voie descendante (DL: BS->CPE) et la voie montante (UL: CPE->BS). Une BS pourra desservir une quarantaine de CPE et pourra offrir un débit de 1,5 Mbps pour le sens DL et de 384 kbps pour le sens UL. Les trames DL+UL d'une durée de 10 ms seront regroupées par 16 dans une structure dite « super trame » d'une durée de 160 ms.

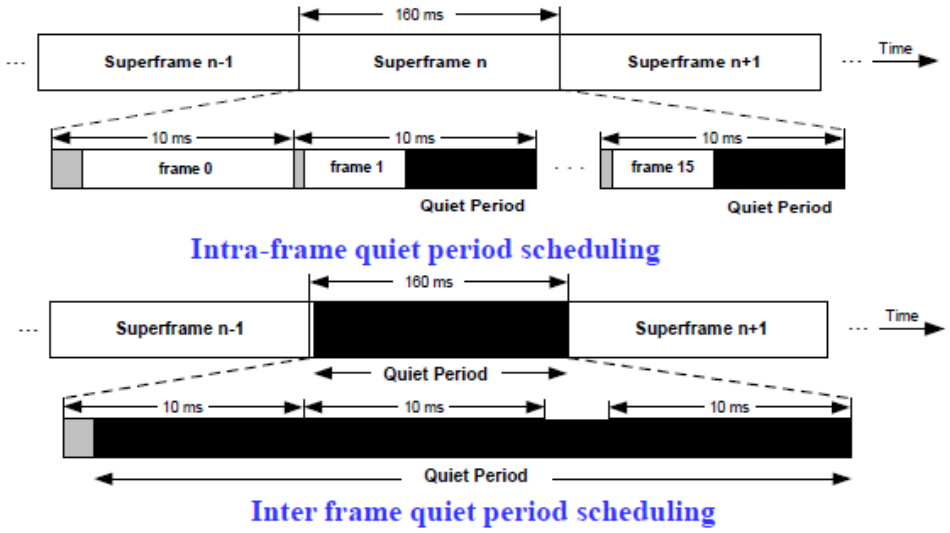


Figure 6-27 La structure des trames: super trame et trame.

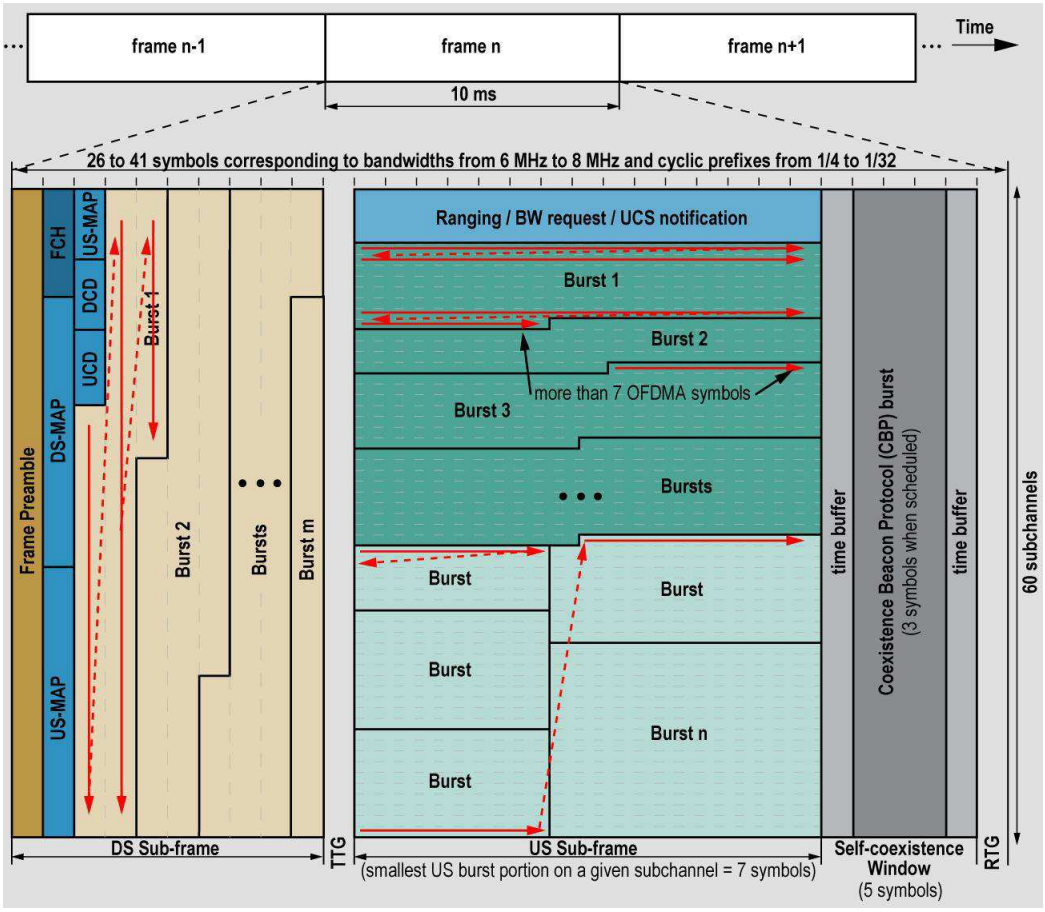


Figure 6-28 Structure d'une trame OFDMA.

Caractéristiques principales de la couche PHY:

- Utilisation de l'OFDM
- Tailles de la FFT (nombre de sous-porteuses max): 2048
- Largeurs de canal utiles: 6, 7et 8MHz
- Modulations utilisées pour les données: QPSK, MAQ16 et MAQ64
- Protocole MAC pour l'accès à la ressource: OFDMA

TV channel bandwidth (MHz)	6	7	8
Total number of subcarriers, N_{FFT}	2048		
Number of guard subcarriers, N_G (L, DC, R)	368 (184, 1, 183)		
Number of used subcarriers, $N_T = N_D + N_P$	1680		
Number of data subcarriers, N_D	1440		
Number of pilot subcarriers, N_P	240		
Signal bandwidth (MHz)	5.6240625	6.5625	7.494375

Figure 6-29 Caractéristiques fréquentielles de 802.22.

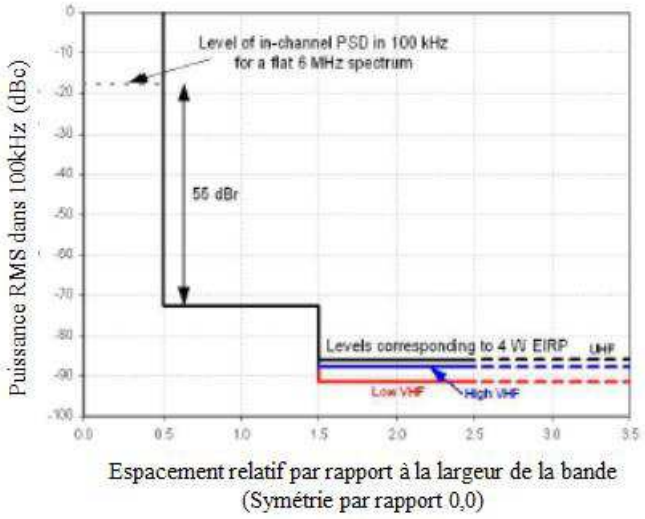


Figure 6-30 Masques d'émission pour un système 802.22.

L'exposimétrie

Problématique de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques: interactions des ondes EM avec la matière biologique.

- Deux types d'effets: Thermiques liés à la valeur moyenne du champ EM et les effets athermiques liés aux variations temporelles des signaux,
- Effets biologiques avérés ne veut pas dire effets sanitaires.

La recommandation 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) est fondée sur les travaux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) qui a proposé des valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques en 1998. Les 18 États membres concernés ont mis en place la limitation de l'exposition du public par voie réglementaire (Allemagne, Autriche, Espagne, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Portugal, République Tchèque, Slovaquie, Roumanie) ou sous forme de recommandations (Danemark, Irlande, Lettonie, Malte, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède). Chypre constitue une exception dans l'Union européenne puisqu'elle n'aurait pas encore mis en place une réglementation en la matière. En France c'est le Décret n° 2002-775 du 3 Mai 2002 qui fixe les valeurs limites d'exposition des personnes en reprenant intégralement les recommandations de la réglementation Européenne.
Toutefois, des approches plus strictes sont appliquées dans certains États membres. Huit États membres de l'Union européenne (la Belgique, l'Italie, le Luxembourg, la Grèce, la Pologne, la Lituanie, la Bulgarie, la Slovénie) ont choisi des valeurs limites inférieures à celles recommandées par l'ICNIRP. Dans l'Europe élargie, la Suisse et le Liechtenstein ont également des réglementations plus restrictives. Les valeurs retenues sont consignées dans le tableau récapitulatif en annexe 2.
Les valeurs choisies par ces autorités ne reposent pas sur une étude scientifique semblable à celle réalisée par l'ICNIRP, mais sont défendues par l'application du principe de précaution face à d'éventuels risques sanitaires liés à l'exposition aux ondes électromagnétiques. Les valeurs limites ont été dans la majeure partie des cas fixées de manière arbitraire. On notera néanmoins les exceptions belge et grecque qui se fondent sur les valeurs ICNIRP auxquelles elles appliquent des coefficients d'abattement.

Le tableau ci-dessous récapitule les réglementations des Etats membres (plus la Suisse et le Liechtenstein) :

Sans modification ou avec modifications mineures des valeurs limites d'exposition		**Autriche**[1] ; **République tchèque** ; **Danemark** ; **Estonie** ; **Espagne** (variations locales sur des bases légales pour les communautés autonomes[2]) ; **Finlande** ; **France** ; **Allemagne** ; **Hongrie** ; **Irlande** ; **Lettonie** ; **Malte** ; **Portugal** ; **Slovaquie** ; **Suède** ; **Pays-Bas** ; **Roumanie** ; **Royaume-Uni**
Avec un « abattement général » sur les valeurs limites	En tous lieux accessibles au public	**Belgique**[3] (par antenne, en tous lieux, 50% en champ des niveaux ICNIRP) **Lituanie** (niveaux de référence 100 fois plus stricts que les niveaux ICNIRP) **Pologne** (fondé sur ex réglementation de l'union soviétique : 6V/m)
	Lieux de vie	**Italie** (20 V/m jusqu'à 3 GHz, 40 V/m au dessus ; 6 V/m par station dans des lieux de vie). Variations régionales[4]
	Lieux sensibles	**Grèce**[5] (84 %, ou 77% lieu de vie, des niveaux ICNIRP en champ) **Bulgarie :** fondé sur ex réglementation de l'union soviétique (exemple : à 900 MHz, 6 V/m)
Limitations seulement dans les lieux sensibles		**Suisse**[6] (tel. mobile 4 V/m à 900MHz ; 6 V/m à 1800MHz ; 3 V/m TV) **Liechtenstein** (idem Suisse, avec un objectif 2012 pour la téléphonie mobile à 0,6 V/m[7])
Abattement pour les antennes de téléphonie mobile seulement		**Luxembourg**[8] (pour téléphonie mobile : 3 V/m)
Réglementation non connue		**Chypre** : pas de réglementation en place (?)

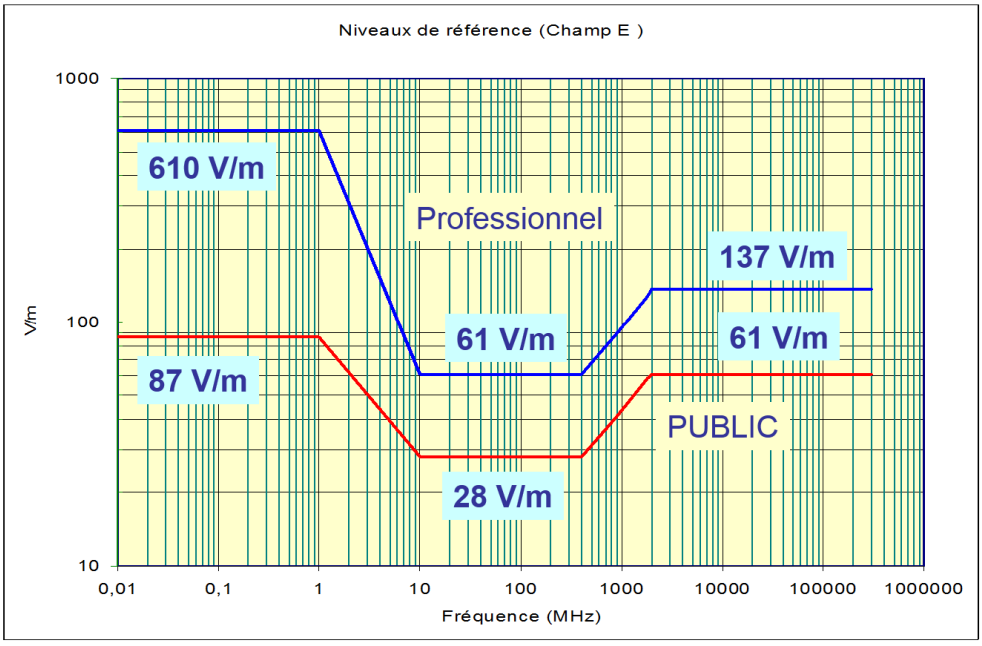


Figure 6-31 Niveaux de référence du champ E en vigueur actuellement en France.

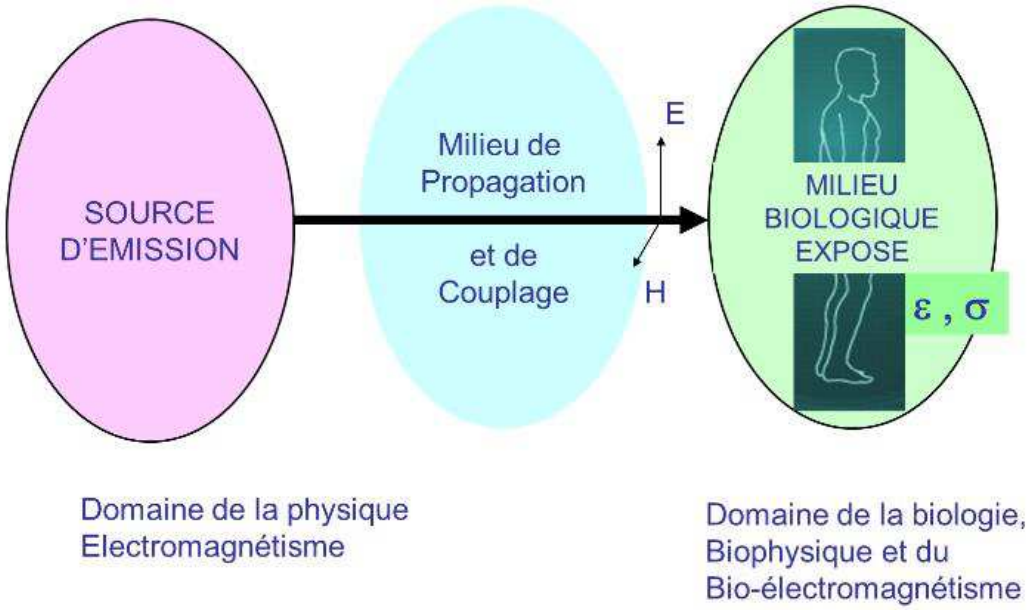


Figure 6-32 Interaction entre le champ électromagnétique et le milieu de propagation.

Le champ électrique et les mesures In-Situ

Deux protocoles de mesures de champs électrique dits *In-Situ* peuvent être utilisés en France: norme Cenelec EN 50492 et protocole ANFR v3. Ces deux protocoles prennent en compte la recommandation de la CEPT: ECC Recommendation (02)04 et décrivent comment doivent être faites les mesures. Elles se basent sur le même algorithme pour le calcul du champ électromagnétique et la détermination de l'exposition des personnes. Les procédures décrivent comment doit se faire l'analyse du site, la recherche des sources et explique le déroulement d'une mesure. Ils sont basés sur deux ou trois approches différentes de l'évaluation (cf. figure 6-34) en fonction du seuil de la densité de puissance (5 à 100 mW/m²) ou d'une valeur de champ E de 0,28 V/m (40 dB en dessous de la limite inférieure de la base définie par l'ICNIRP).
Ce document a pour objectif de décrire le protocole de mesure retenu par l'Agence nationale des fréquences concernant l'application du décret n° 2002-775 du 03 mai 2002 conformément aux exigences de la norme NF EN 50492, norme de base pour la mesure du champ électromagnétique sur site, en relation avec l'exposition du corps humain à proximité des stations de base, dont les références ont été publiées au Journal officiel du 7 janvier 2009, ci-après désignée la norme. Pour les thématiques non couvertes par la norme (signaux radar), la recommandation ECC (02)04 peut être utilisée (disponible sur le site Internet de l'ECO, European communications office).

Le présent protocole traite des mesures nécessaires pour comparaison aux niveaux de référence des champs électromagnétiques pour des fréquences de 100 kHz à 300 GHz, à l'exception de ceux concernant les courants de contact d'objets conducteurs. Les champs basses fréquences de 0 Hz à 100 kHz ne sont pas traités par le présent document. Le processus adopté se compose d'une analyse du site suivie de relevés de niveaux de champs électromagnétiques et du calcul des incertitudes associées. Les niveaux relevés et, le cas échéant pour certaines catégories de réseaux, extrapolés, sont ensuite comparés au niveau de référence de l'annexe 2.2 – A du décret du 3 mai 2002; une application des critères de l'annexe 2.3 – B de ce même décret prenant en compte le cumul des sources est également effectué. Le respect de tous les niveaux de référence garantit le respect des restrictions de base de l'annexe 2.1 du décret. Si les valeurs mesurées et, le cas échéant, extrapolées sont supérieures au niveau de référence, il n'en découle pas nécessairement un dépassement des restrictions de base.

Bande de fréquences	Services
100 kHz – 30 MHz	Services HF (y compris la radiodiffusion sonore)
30 MHz – 87,5 MHz (hors TV)	PMR
87,5 MHz – 108 MHz, 174 MHz – 223 MHz	Radiodiffusion sonore (FM – RNT)
108 MHz – 880 MHz (hors TV et RNT)	PMR – BALISES
47 MHz– 68 MHz, 470 MHz– 830 MHz	TV[5]
790 MHz – 862 MHz	Dividende numérique[6]
921 MHz – 960 MHz	GSM 900 et UMTS 900 (925 – 960 MHz) – GSM R (921 – 925 MHz)
960 MHz – 1710 MHz	RADARS - BALISES – FH
1805 MHz – 1880 MHz	GSM 1800
1880 – 1900 MHz	DECT
2100 – 2170 MHz	UMTS 2100
2200 – 6000 MHz (hors WiFi)	RADARS – BLR (Wimax) - LTE – FH
2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz	Réseaux locaux radioélectriques (WiFi)

Figure 6-33 Liste des différents services à prendre en compte.

Dans ce cas, il conviendrait dans un premier temps de reconsidérer la valeur des paramètres d'extrapolation en identifiant la configuration réellement installée. Si le dépassement persiste, il convient d'évaluer si les niveaux d'exposition sont inférieurs aux restrictions de base. Ce dernier point n'est cependant pas abordé dans le présent protocole.

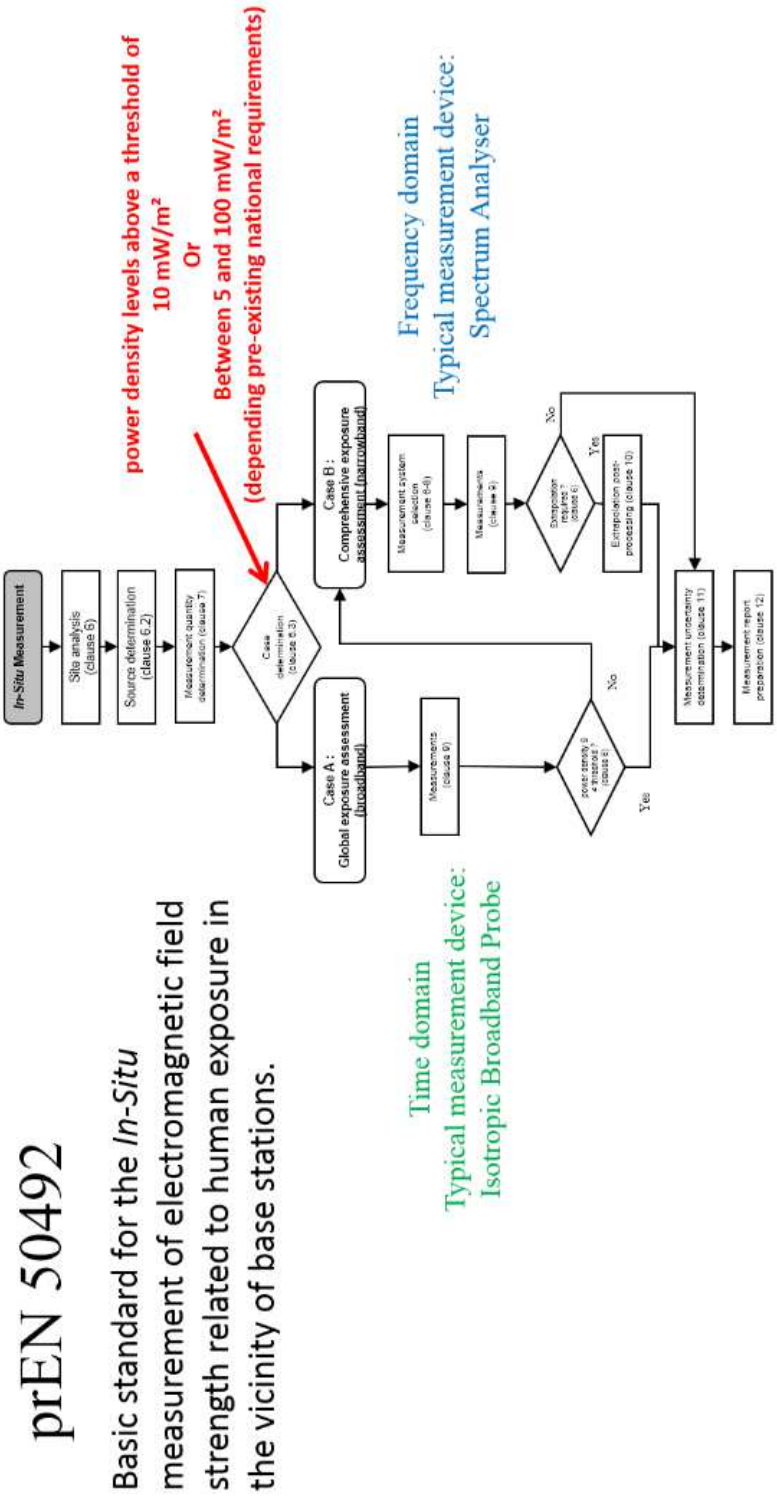


Figure 6-34 Exemple de protocole de mesure *In-Situ*: EN 50492.

Appareils de mesure

Les normes ou protocoles de mesures en vigueur en France proposent deux types de mesures, correspondants aux deux cas décrits ci-dessus, qui se font dans deux domaines différents: temporel et fréquentiel ayant chacun leurs avantages et inconvénients, mais avec des résultats qui doivent, au final, êtres identiques.
Sources: Agilent [AGI99, AGI00, AGI06a, AGI06b, AGI09, AGI10a, AGI10b], Rohde et Schwartz [ROH03, KRU04, ROH08a, ROH08b] et Anritsu [ANR11].

Domaine Fréquentiel: L'analyseur de spectre ou le récepteur RF

L'analyseur de spectre fonctionne dans le domaine fréquentiel et il affiche la valeur de la densité spectrale de puissance du signal sur une plage de fréquences donnée (SPAN) pendant une durée finie (SWEEP) et intégrée dans le filtre d'analyse ou filtre de résolution (RBW).

Figure 6-35 Chaine de mesure ou de réception et Analyseur de spectre.

Pour remonter à la valeur du champ E, il faut donc avoir la puissance totale du signal: c'est-à-dire choisir un RBW légèrement supérieur à la bande utile puis de remonter au champ E capté par l'antenne de mesure par la formule donnée ci-dessus. On peut donc facilement, dans un environnement complexe (sources multiples), remonter au champ E de chaque émetteur: point fort de l'analyseur.

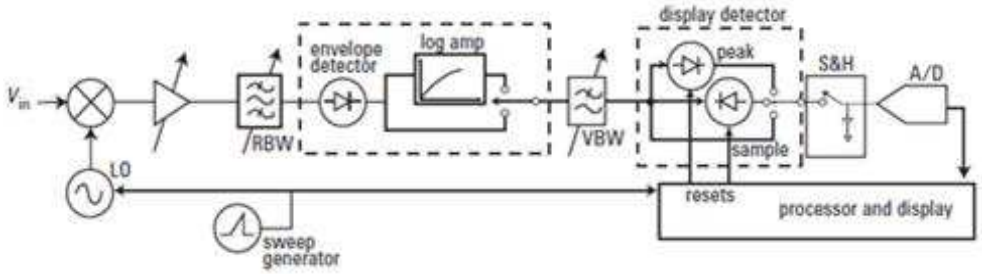


Figure 6-36 Schéma de principe simplifié d'un analyseur de spectre.

L'autre point fort est sa sélectivité. Par contre le point faible réside dans la largeur du filtre d'analyse: typiquement de quelques MHz (1 à 5MHz) pour les appareils utilisés sur le terrain et plusieurs dizaines de MHz pour les appareils de laboratoire (jusqu'à 40MHz), valeur à comparer avec les bandes occupées par les nouveaux systèmes de communication (jusqu'à 160Mhz).

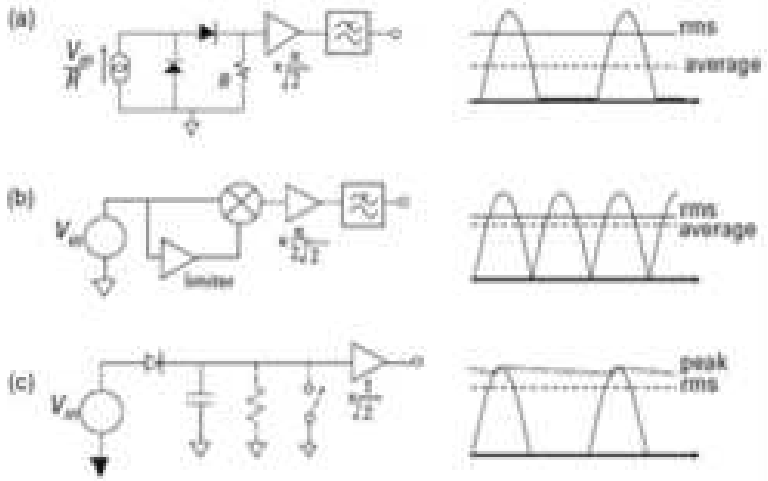


Figure 6-37 Différents type de détecteur d'énergie d'un analyseur de spectre.

Un autre paramètre important pour réaliser une bonne mesure est le choix du type de détecteur d'énergie, qui peut suivant la forme d'onde du signal sous test donner des résultats très différents. Les protocoles de mesures donnent des indications sur le choix des paramètres à utiliser en fonction du service et du type de la mesure: CEM ou exposition.

Domaine temporel: La sonde isotropique large bande

C'est un détecteur d'énergie qui travaille dans le domaine temporel, la valeur du champ E (V/m) affiché correspond à l'intégral de E sur toute la bande passante de la sonde. Certaines sondes peuvent intégrer des filtres capables

d'afficher le champ E résultant dans différentes bandes de service (TV, GSM, UMTS, WiFi, …).

Figure 6-38 Exemples de sondes isotropiques large bande avec ou sans filtre de services.

Le principal atout des sondes isotropique est leur grande bande passante (pouvant atteindre plusieurs GHz) limitée par le type d'antenne utilisé, leur principal défaut est un temps de réponse assez lent, de l'ordre de la µs à comparer avec des variations de l'ordre de la dizaine de ns, ce qui entraine un moyennage des signaux et peut-être une non-prise en compte des variations rapides.

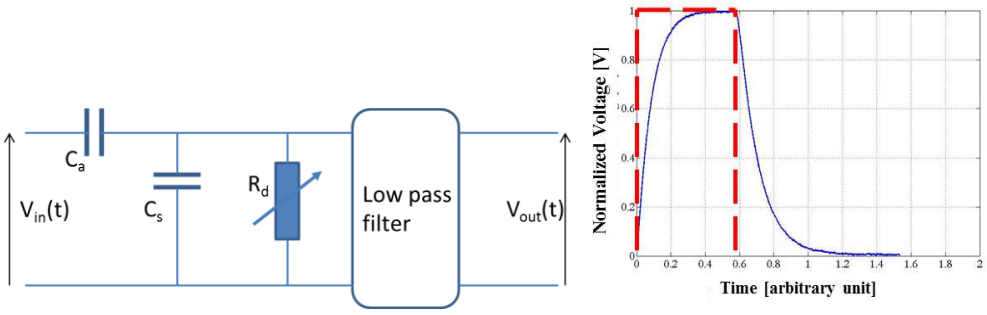


Figure 6-39 Schéma électrique équivalent d'un détecteur d'énergie et sa réponse à une impulsion.

Comme tous les systèmes actuels, elles sont aussi calibrées et étalonnées en régime sinusoïdal établi (CW).

Articles publiés

Article dans des revues avec comité de lecture:

[LET13a] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Co-site coexistence between future L-DACS2 and Legacy DME Systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems TAES*, vol. 49, no. 4, October 2013.

[LET13b] T. Letertre, V. Monebhurrun, Z. Toffano, "Accurate Measurement of RF Exposure from Emerging Wireless Communication Systems," *Journal of Physics: Conference series (JPCS)*, IOP Conference series, 2013.

[LET12] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Survey on the Future Aeronautical Communication System and its development for continental communications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2012, volume PP, Issue: 99.

[LET11a] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Electromagnetic Compatibility from a Time-Frequency Perspective," 2011, *Revista Telecomunicações*.

Congrès internationaux:

[LET11b] T. Letertre, A. Azoulay, R. De Lacerda, "Study of the RF Emission of Various Electronic Devices Used by the Public," IEEE COMCAS 2011, November 2011, Tel Aviv, Israel.

[LET11c] T. Letertre, V. Monebhurrun, Z. Toffano, "Measurements of Digitally Modulated Pulsed RF Signals Using Isotropic Broadband Probes," BEMS 2011, June 2011, Halifax, Canada.

[LET11d] T. Letertre , V. Monebhurrun , Z. Toffano, "Electromagnetic Field Measurements of WIMAX Systems Using Isotropic Broadband Probes," IMS 2011, June 2011,Baltimore, USA.

[LET11e] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Radio Systems Coexistence from a time Domain Perspective: Principle and example," IWT 2011, May 2011, Rio de Janeiro, Brazil.

[LET10a] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "How the L-DACS2 radio-frequency signals modulation affects the DME performance," IEEE/AIAA DASC2010, October 2010, Salt Lake city, UT, USA.

[LET10b] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Effect of the aeronautical L-DACS2 radiofrequency signals on the DME system performance," IEEE/VTC2010 fall, Pages 1-5, September 2010, Ottawa, Canada.

[LET09a] V. Monebhurrun, T. Letertre, "A Novel Measurement Procedure for the Specific Absorption Rate Conformity Assessment of WiFi Devices," APMC 2009, Pages 401-404, December 2009, Singapore.

[LET09b] N. Neji, A. Azoulay, R. De Lacerda, T. Letertre, O. Outtier, "Interference analysis for the future Aeronautical Communication System," PIMRC 2009, Pages 1236-1240, September 2009, Tokyo, Japan.

[LET09c] T. Letertre, A. Destrez, A. Azoulay, F. Gaudaire, C. Martinsons, "Characterization of compact fluorescent lights RF emissions in the perspective of human exposure," EMC Kyoto 2009, July 2009, Kyoto, Japan.

[LET09d] Azoulay, O. Merckel, T. Letertre, "ELF environmental exposure of the population A case study in a small city, south of Paris, France," EMC Kyoto 2009, July 2009, Kyoto, Japan.

[LET09e] T. Letertre, V. Monebhurrun, "Evaluation of electromagnetic field from Wifi devices: in-situ measurements," BEMS 2009, June 2009, Davos, Switzerland.

[LET09f] V. Monebhurrun, T. Letertre, "Evaluation of electromagnetic field from Wifi devices: SAR measurements," BEMS 2009, June 2009, Davos, Switzerland.

[LET09g] V. Monebhurrun, T. Letertre, "Total radiated power measurements of Wifi devices using a compact reverberation chamber," EMC Zurich2009, Pages 65-68, January 2009, Zurich, Switzerland.

Congrès nationaux:

[LET09h] N. Neji, R. De Lacerda, T. Letertre, A. Azoulay, O. Outtier, "Radioelectric compatibility of the future Aeronautical Communication System," ITST 2009, Pages 243-248, October 2009, Lille, France.

Autres communications

[LET09i] T. Letertre, A. Destrez, A. Azoulay, F. Gaudaire, C. Martinsons, "Projet d'élaboration d'un protocole de caractérisation des émissions électromagnétiques des lampes fluorescentes compactes à économie d'énergie," Article revue REE N°1 Janvier 2009.

Glossaire

3GPP: 3rd Generation Partnership Project
ADEME: Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFSSET: Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ANFR: Agence Nationale des FRéquences
ANSES: Agence Nationale de SÉcurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization
CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CISPR: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
ComOP: Comité Opérationnel
CSTB: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
ETSI: European Telecommunications Standards Institute
EUROCAE: European Organization for Civil Aviation Equipment
EUROCONTROL: European Organization for the Safety of the air Navigation
FAA: Federal Aviation Administration
FCC: Federal Communications Commission
ICAO: International Civil Aviation Organization
ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC: International Electrotechnical Commission
INRS: Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
ITU: International Telecommunication Union
NASA: National Aeronautics and Space Administration
UTE: Union Technique de l'Électricité

Références

[ADA10] D. Adamson, D. Bownds, A. Fernandez and E. Goodal, "The Response of Electric Field Probes to Realistic RF Environments," IEEE MTT-S conference, Anaheim, CA, USA, 2010.
[AFS09] AFSSET, Saisine 2007/007, Rapport d'expertise collective, "Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences," 2009
[AGI99] Agilent Technologies, Application Note 1303, "Spectrum Analyzer: Measurements and Noise," 1999.
[AGI00] Agilent Technologies, Application Note 243, "The Fundamentals of Signal Analysis," 2000.
[AGI06a] Agilent Technologies, Application Note 150, "Spectrum Analysis Basics," 2006.
[AGI06b] Agilent Technologies, Application Note 154, "S-Parameter Design," 2006
[AGI09] Agilent Technologies, Application Note 1449, "Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements," 2009.
[AGI10a] Agilent Technologies, "The Architecture of a modern Spectrum Analyzer," X-Series Spectrum Analyzers Seminar, 2010.
[AGI10b] Agilent Technologies, "Digital Signal Analysis," X-Series Spectrum Analyzers Seminar, 2010.
[AGH01] K. Al Agha, G. Pujolle, G. Vivier, "Réseaux de mobiles & réseaux sans fil," Editions Eyrolles, ISBN 2-212-11018-9, 2001.
[AGR02] S. D. Agrawal, Q-A Zeng, "Introduction to Wireless and Mobile Systems," Brooks/Cole publishing, ISBN 0534-40851-6, 2002.
[AND01] B. Andersen, "Crest factor analysis for complex signal processing: Understanding the complexities of summing digital signals," www.rfdesign.com, 2001.
[ANF11] ANFR, "Protocole de mesure In-Situ ANFR v3", 2011.
[ANR11] Anritsu, "Guide to Spectrum Analysis,", 2011.
[AZC05] F. J. Azcondo, C. Branas, R. Casanueva and S. Bracho, "Power-Mode Controled Power-Factor Corrector for Electronic Ballast," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 56-65, 2005.
[BAS04] F. Bastide Thèse n°2137: Analyse de la Capacité des Futurs Signaux GalileoE5a/E5b et GPS L5 et leurs intérêts pour l'Aviation Civile , 2004
[BAU02] G. Baudoin et collectif d'auteurs, "Radiocommunications Numériques/1: Principes, Modélisation," Dunod, ISBN 2-10-005580-1,2002.
[BOR09] Ch. Bornkessel, M. Shubert, M. Wuschek, "Determination of General Public Exposure to WIMAX Base Station," Proc. Intl. Symposium on EMDC, Zurich, Switzerland, 2009.
[BRA04] C. Branas, F. J. Azcondo and S. Bracho, "Study of Output Power Variation due to Component Tolerences in LCsCp Resonant Inverters Applied to HPS Lamp Control," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 122-131, 2004.

[BUR03] J. Burrell, "Disruptive Effects of electromagnetic Interference on Communication and Electronic Systems," MSc thesis in Telecommunications, Georges Mason University, Fairfax, US, 2003.
[CAR09] L. Cardoso et al., "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks, Cognitive Radio Networks: Architectures, Protocols and standards," Auerbach Publications, 2009.
[CAR10] A. Carta, C. Di Nallo, A. Faraone, G. Bit Babik, R. Stefanelli, S. Trinchero and D. Trinchero, "Experimental Set-up for the Characterization and Calibration of SAR Probes in presence of Digital Signals Modulated with Frequency Multiplexing, " EMF Bordeaux Event, France, 2010.
[CEA11] Commission de l'environnement, de l'agriculture et des questions territoriales Rapporteur: M. Jean HUSS, Luxembourg, Groupe socialiste, " Le danger potentiel des champs électromagnétiques et leur effet sur l'environnement," 2011.
[CEI05] NF EN ISO/CEI 17025,"Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais," 2005.
[CEI12] IEC 62493, "Assessment of lighting equipment related to human exposure to electromagnetic fields," 2012.
[CEN08] CENELEC, Protocol prEN 50492, "Norme de base pour la mesure in-situ des champs électromagnétiques associés à l'exposition des personnes aux stations base," 2008.
[CEN10] CENELEC/IEC 62479, "Assessment of the Compliance of Low Power Electronic and Electrical Apparatus with the Basic Restrictions Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields (10MHZ-300GHz)," 2010.
[CEP02] CEPT/ERC/RECOMMENDATION 74-01E Spurious Emissions, 2002.
[CEP05] CEPT ECC/CPG07/PT3(05)062: Study plan towards the feasibility of AM(R)S sharing the sub- band 960-[1164]MHz with ARNS and an aeronautical Future Radio System (FRS) in line with the WRC'07 ICAO Position, 2005.
[CEP11] CEPT, "World Radiocommunication Conference (WRC-12) Plenary Meeting - European Common Proposals for the work of the Conference - Part 4 -Agenda Item1.4," CPG-12-7, Addendum 4 to Document 5-E, 2011.
[CIG09] Brochure CIGRE C4.203, "Guide technique pour la mesure des champs électriques et magnétiques basse fréquence à proximité des lignes électriques aériennes," 2009.
[CIS02] IEC - CISPR 16-1, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods: Radio disturbance and immunity measuring apparatus," 2002.
[CIS06] IEC CISPR 15, " Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment," 2006.
[COM11] F. Brottes, Rapport ComOP Expérimentation," Concertation et information locales dans le cadre de l'implantation d'antennes relais: Diminution de l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais de téléphonie mobile," 2011.

[COR06] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, S. Shankar N, " IEEE 802.22: an Introduction to the First Wireless Standard based Cognitive Radios," Journal of Communications, Vol. 1 No. 1, April 2006.
[DEG90] P. Degauque, J. Hamelin, "Compatibilité électromagnétique: bruits et perturbations radioélectriques," ed. Dunod, Collection technique et scientifique des télécommunications, ISBN 204018807X, 9782040188078, 1990.
[DIN01] N. Dinur and D. Wulich, "Peak-toAverage Power Ratio in High-Order OFDM," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 49, No. 6, pp 1063-1072, June 2001.
[DOD80] S. H. Dodington, "Development of a 1000MHz Distance Measuring Equipment," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 533-540, 1980.
[DUB06] S. Dubouloz, L. Ouvry, "Régulation et Normalisation pour les Communications Ultra Large Bande (UWB)," Journées Scientifiques du CNFRS, Union Radio-Scientifique Internationale (URSI), Paris, 2006.
[DUR04] G. Dürrenberger, G. Klaus, "EMF von Energiesparlampen: Feldmessungen und Expositionsabschätzungen mit Vergleich zu anderen Quellen im Alltag," Schlussbericht, 2004.
[EPR01] Electric Power Research Institute Technical Report, "Electric and magnetic field Guideline Evaluation," http://epri.com, Interim Report, 2001.
[ETS02] ETSI EN 301 489-1, " Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements," 2002.
[ETS10] ETSI EN300 175-2, "Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT): Common Interface (CI) - Part 2 – Physical Layer (PHY)," v2.3.1, 2010.
[ETS12] ETSI EN 301 893,"Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive," 2012.
[EUR87a] EUROCAE, "DME/N and DME/P airborne equipment," ED-54, 1987.
[EUR87b] EUROCAE, "Minimal Operating Performance Requirements for Distance Measuring Equipment Interrogator (DME/p and DME/N) Operating within the Radio Frequency Range 960 to 1215MHz," ED-54, 1987.
[EUR00] EUROCONTROL DIS/COM/SPG/CP0108: Radio characteristics of aviation radio systems, 2000.
[EUR04] EUROCONTROL/FAA, Annexe A: Initial Communications Operating Concept and Requirements for the Future Communication System, 2004.
[EUR03] EUROCONTROL ED-73B: Minimum Operationnal Performance Specification for Secondary Surveillance Radar Mode S Transponders, 2003.
[EUR05] EUROCONTROL/FAA: Initial Communication Operating Concept and Requirements, en liaison avec le document WG8C-WP26, 2004.
[EUR06] EUROCONTROL/FAA, Future Communication Study Operational Concept and Requirements Team, "Future Communication Infrastructure - Technology Investigations, Evaluation Scenarios," version 1, 2006.

[EUR07a] EUROCONTROL/FAA, Futur Communication Study - Operational Concepts and Requirements Team, "Future Communications Infrastructure, Technology Investigations and Evaluation Scenarios," Technical Report, 2007.
[EUR07b] EUROCONTROL/FAA, "Future Communication Study – Final Conclusions and Recommendation Report," version1.1, Memorandum of cooperation, Action plan 17, 2007.
[EUR07c] EUROCONTROL/FAA, "Future Communication Study – Infrastructure step 2: Technology Assessment Results," Final, 2007.
[EUR09a] EUROCONTROL, "L-DACS2 Transmitter and Receiver Prototype Equipment Specifications," Delivrable D3, Technical Report, 2009.
[EUR09b] EUROCONTROL, "L-DACS2 System Definition Proposal," Delivrable D2, Technical Report, 2009.
[EUR10] EUROCONTROL , "Medium Term Forecast: IFR Flight Movements 2010-2016," 2010.
[FCC02] Federal Communications Commission, Part 15: Radio Frequency Devices, Operation within the Bands 902-928MHz, 2400-2483.5MHz and 5725-5850MHz Title 47, vol. 1, 2002.
[FCC10] FCC, "Second Memorandum Opinion and Order in the matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900MHz and in the 3GHz Band," 2010.
[FOE06] M. D. Foegelle, "Coexistence of Converged Wireless Communications Devices," IEEE Practical Papers, Article and Application Notes, 2006.
[GIL08] T. Gilbert, J. Jin, J. Berger, S. Henriksen and J. Budinger, "Future Communication Study Technology Investigation Conclusions and Recommendations," Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference Proceedings, ICNS, 2008.
[HAL02] T. Halonen, J. Romero, J. Melero, "GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS," John Wiley and son, Ltd, Publication, ISBN 0-470-84457-4, 2002.
[HEI02] J. Heiskala, J. Terry, "OFDM Wireless LANs: A Theorical and Practical Guide," Sams Publishing, ISBN 0-672-32157-2, 2002.
[HOL09] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access," John Wiley and son, Ltd, Publication, ISBN 978-0-470-99401-6, 2009.
[HUA05] L. Hua, S. Miaosen, J. Yifeng and Q. Zhaoming, "A Novel Low-frequency Electronic Ballast for HID Lamps," IEEE Trans. On Industrial Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1401-1408, 2005.
[IAN83] M. Ianovici et J-J. Morf, "Compatibilité Électromagnétique," Presses Polytechniques Romandes, ISBN 2-88074-020-7, 1983.
[ICA96] ICAO, Convention on International Civil Aviation, Annex 10: Aeronautical Telecommunications, Volume I Navigation Aids, 1996.
[ICA02] ICAO, Convention on International Civil Aviation, Annex 10: Aeronautical Telecommunications, Volume IV Surveillance Radar and Collision Avoidance Systems, 2002.

[ICA03] ICAO document 9718-AN/957: Handbook on radio frequency spectrum requirements for civil aviation", 2003.
[ICA05a] ICAO ACP/WGF14/WP12: Interference Susceptibilities of Systems Operating in the 960-1215 MHz Band. Application to the Compatibility Analysis of the Future Communication System (Frédéric Bastide, Alain Delrieux), 2005.
[ICA05b] ICAO ACP/WGC9-WP03: Manual on the Universal Access Transceiver: Detailed Technical Specifications, 2005.
[ICA05c] ICAO ACP/WGC9-WP04: Implementation Manual for the Universal Access Transceiver, 2005.
[ICA09] ICAO, Aeronautical Telecommunications – Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, "Radio Navigations Aids," vol. 1, amendment 84, 2009.
[ICN98] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," Health Physics, vol. 74, pp 494-522, 1998.
[ICN01] ICNIRP, "Guide pour l'établissement de limite d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques", Cahier de notes documentaires- Hygiènes et sécurité du travail, no. 182, 2001.
[ICN09] ICNIRP, "Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)," Review of the Scientific Evidence and Health Consequences, ISBN 978-3-934994-10-2, 2009.
[IEC98] IEC 61786, "Mesure de champs magnétiques et électriques à basse fréquence dans leur rapport à l'exposition humaine – Prescriptions spéciales applicables aux instruments et recommandations pour les procédures de mesure," 1998.
[IEC09] IEC 62110, "Champs électriques et magnétiques générés par les systèmes d'alimentation à courant alternatif- Procédures de mesure des niveaux d'exposition du public," 2009.
[IEEEa] IEEE 802.11: The Working group on Wireless Local Area Networks (WLAN) Standards, http://www.ieee802.org/11/, amendments a, b, g, n, ac, ad and af.
[IEEEb] IEEE 802.15: The Working group for Wireless Personal Area Networks (WPAN) Standards, http://www.ieee802.org/15/, Parts 15.1, 15.3 and 15.4.
[IEEEc] IEEE 802.16: The Working group on Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN) Standards, http://www.ieee802.org/16/, amendments a, c, e, f and m.
[IEEEd] IEEE 802.22: The Working group on Wireless Regional Area Networks (WRAN) Standards. Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology in TV Whitespaces, http://www.ieee802.org/22/.
[IEEE05] IEEE Standard, "Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9kHz to 40GHz," IEEE Std. 1309-2005, 2005.

[INR09] INRS, "Classification des sources d'exposition aux champs électromagnétiques," http://www.inrs.fr, 2009.
[ITU86] ITU – Radiocommunications Sector, "Compatibility Analysis between a passive service and an active service allocated in adjacent and nearby bands," Recommendation IUT-R SM. 1633, 1986.
[ITU05a] ITU – Radiocommunications Sector, "Protection Criterion for the Aeronautical Radionavigation Service with Respect to Aggregate Emissions from Space Stations in the Radionavigation Satellite Service in the Band 1164-1215MHz," Recommendation ITU-R M 1639-1, 2005.
[ITU05b] International Telecommunication Union document 8B/-E: Study plan towards the feasibility of AM(R)S sharing the sub- band 960--[1164] MHz with ARNS and an aeronautical Future Radio System (FRS) in line with the WRC'07 ICAO Position, 2005.
[ITU06] ITU – Radiocommunications Sector, "An additional methodology for the evaluation of the effect of the interference between radiocommunication networks operating in a shared frequency band," Recommendation IUT-R SM. 1751, 2006.
[ITU07a] ITU – Radiocommunications Sector, "Unwanted Emission in the spurious domain," Recommendation ITU-R SM 329-10, 2007.
[ITU07b] ITU – Radiocommunications Sector, "Studies in the Frequency range from 1GHz to about 70GHz," Recommendation ITU-R F 1336-2, 2007.
[ITU07c] ITU F-1336-2 – Radiocommunications Sector, "Reference Radiation pattern of omnidirectional, sectorial and other antennas in point-to-multipoint Systems for use in Sharing studies in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz, " 2007.
[ITU07d] ITU – Radiocommunications Sector, "Methodology for assessing the maximum aggregate Equivalent Power Flux-Density at an Aeronautical Radionavigation service Station from all Radionavigation-Satellite Service Systems Operating in the 1164-1215MHz Band," Recommendation ITU-R M 1642-2, 2007.
[ITU08a] ITU – Radiocommunications Sector, "Frequency and Distance separations," Recommendation ITU-R SM 337-6, 2008.
[ITU09] IUT-R Working party 5b, "AM(R)S Sharing feasibility in the 960-1164MHz Band," version 2.1, Working document towards a preliminary draft new report ITU-R M, Doc. ECC/CPG1/PTC, 2009.
[ITU08b] ITU, "Radio Regulation," Regulatory Publication, vol 1, Note 5.150, ISBN 92-61-12452-6, 2008.
[ITU10a] ITU – Radiocommunications Sector, "Unwanted Emission in the out of band domain," Recommendation ITU-R SM 1541-2, 2010.
[JOE99] Journal Officiel des communautés Européennes, DIRECTIVE 1999/5/CE du Parlement Européen et du Conseil, "Directive R&TTE: concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité," 1999.
[JOE04] Journal Officiel des communautés Européennes, DIRECTIVE 2004/108/CE du Parlement Européen et du Conseil, "Directive CEM: relative

au rapprochement des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique et abrogeant la directive 89/336/CEE," 2004.
[JOE06] Journal of the European Union, "Commission communication in the framework of the implementation of Directive 1999/5/EC: (2006/C 201/01) and (2006/C 314/04)," 2006.
[JOS08a] W. Joseph, L. Verloock and L. Martens, "Accurate Determination of Electromagnetic Field Due to WIMAX Base Station Antennas," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol.50, no. 3, pp. 730-735, 2008.
[JOS08b] W. Joseph, C. Olivier and L. Martens, "Accurate Assessment of Electromagnetic Exposure from WIMAX Signal using Spectum Analyzer," *IEEE Trans. on Instrumentation Measurement*, vol.57, no. 3, pp. 518-521, 2008.
[JOS12] W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne, G. Vermeeren and L. Martens, "Assessment of RF Exposure from Emerging Wireless Communication Technologies in Different Environments," Health Physics, vol. 102, no. 2, pp. 161-172, 2012.
[KEL63] J. R. Kelly, "A New light-Weight DME," *IEEE Trans. on Aerospace and NavigationalElectronics*, vol. 10.1109, no. 0, pp. 3.4.4.1-3.4.4.7, 1963.
[KEL84] J. R. Kelly, "System Considerations for the new DME/P International Standard," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 2-24, 1984.
[KHE09] Y. Khee, "Radio Wave Propagation in Metal Train Compartments," MSc thesis in Embedded Systems, Delft University of Technology, Netherland, 2009.
[KRA05] A. Kramer, S. Kühn, U. Lott and N. Kuster, " Development of Procedures for the Assessment of Human Exposure to EMF from Wireless Devices in Home and Office Environments," Final Report IT'IS Foundation, ETH Zurich, Switzerland, 2005.
[KRU04] R. Krüger, H. Mellein, "UMTS: Introduction and Measurement," Rohde&Schwarz, 2004.
[LEK12] D. Lekomtcev, R. Marsalek, "Comparison of 802.11af and 802.22 standards- physical layer and cognitive functionality," elektrorevue, Vol. 3, No. 2, ISSN 1213-1539, June 2012.
[LOU05] Y. Louët, "Non linéarité et multiporteuses: Problèmes et solution," Polycopié Supélec, 07320/32a, 2005.
[MAG06] Magne, A. Azoulay, J. Lambrozo and M. Souques, "Comparison of magnetic field meter for ELF exposure measurement," Bioelectromagnetics Society Conference, BEMS, 2006.
[MAN04] Mangold, Z. Zhong, K. Challapali, C-T. Chou, "Spectrum Agile Radio: Radio Resource measurements for Opportunistic Spectrum Usage," IEEE Globecom, 2004.
[MAS07] M. P. Maslanyj et al., "Investigation of the sources of residential power frequency magnetic field exposure in the UK Childhood Cancer Study," Journal of Radiological Protection, no 27, pp. 41-58, 2007.

[MIC09] J. Micallef et al., "FCI Technology Investigations: L- Band Compatibility Criteria and Interference Scenarios Study," Delivrable S1-S7, Helios for EUROCONTROL, Technical Report P1031D005, 2009.
[MIN03] Projet d' « Accord particulier entre le ministre de la défense et le ministre chargé de l'aviation civile pour l'utilisation du système MIDS » du 11 décembre 2003.
[MIN09] Ministère de la santé et des sports, Table ronde "radiofréquences, santé, environnement," Fiche n°3 "Comparaison des règlementations Européennes," 2009.
[MIN10] Ministère de la Santé et des Sports, "Décret no 2010-1207 relatif à l'affichage du débit d'absorption spécifique des équipements terminaux radioélectriques", 2010.
[MIT00] J. Mitola, "Software Defined Radio Architecture Refinement for JTRS'" MILCOM Conference, 2000.
[MIT08] J. Mitola, "Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective," IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2008.
[MON10] V. Monebhurrun, "Effect of Time Averaging of Pulsed Radio Frequency signals on Specific Absorption Rate (SAR) Measurements," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 1, pp. 49-55, 2010.
[MUL02] P. Mühlethaler, "802.11 et les réseaux sans fil," Editions Eyrolles, ISBN 2-212-11154-1, 2002.
[MUR81] K. Murota and K. Hirade, "GMSK Modulation for digital Mobile Radio Telephony," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, pp. 1044-1050, 1981.
[NAL06] C. Di Nallo and A. Faraone, "Effect of Amplitude modulation of the CDMA IS-95 Signal on SAR Measurements," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 3, pp. 552-562, 2006.
[NAS05a] NASA/CR-2005-213587: Technology assessment for the Future Aeronautical Communications System, 2005.
[NAS05b] NASA, "Technology Assessment for the Future Aeronautical Communication System," CR-2005-213587, ITT industries, Reston, VI, USA, 2005.
[NUA07] L. Nuaymi, "WIMAX: Technology for Broadband Wireless Access," John Wiley and son, Ltd, Publication, ISBN 0-470-02808-4, 2007.
[PEC09] Directive 2004/40/CE du Parlement Européen et du Conseil, "Directive Travailleurs," 2009.
[PRO01] J. G. Proakis, "Digital Communications," 4 Ed, McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-232111-3, 2001.
[RAN85] J. Randa and M. Kanda, "Multiple-Source, Multiple-Frequency Error of an Electric Field Meter," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. ap33, no 1, January, 1985.
[RAP99] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practice," Prentice Hall PTR, ISBN 0-13-375536-3, 1999.

[RIE09] M. Riegel, D. Kroeselberg, A. Chindapol, "Deploying Mobile WIMAX," John Wiley and son, Ltd, Publication, ISBN 978-0-470-69476-3, 2009.
[ROH03] Rohde&Schwarz, Application Note 1EF48, "Power Measurement on Pulsed Signals with Spectrum Analyzers," 2003.
[ROH08a] Rohde&Schwarz, Application Note 1MA127, "Overview of Tests on Radar Systems and Components," 2008.
[ROH08b] Rohde&Schwarz, Application Note 1EF75, "Measurement on generic OFDM Signals," 2008.
[RUM09] M. Rumney, "LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges," Agilent Technologies Publication, ISBN 978-988-17935-1-5, 2009.
[SAN73] L. Sanders and Jr. V. Fritch, "Instrument Landing Systems," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 435-454, 1973.
[SAR06] A. Sarolic, V. Roje and B. Modlic, "Measurement of Electric Field Probe Error for Pulsed Signals," *Proc. IEEE Intl. Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 2, pp. 244-248, Portland, OR, USA, 2006.
[SAU07] S. Saunders, A. Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems," John Wiley and son, Ltd, Publication, ISBN 978-0-8493-9254-2, 2007.
[SHA49] C. E. Shannon, "Communication in presence of Noise," Proc. Institute of Radio Engineers, vol. 37: pp 10-21, 1949.
[SHA03] M. Sharif, M. Gharavi-Alkansari and B.H. Khalaj, "On the Peak-to-Average Power of OFDM Signal Based on Oversampling," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 51, No. 1, pp 72-78, January 2003.
[SHA01] M. Sharif and M. Gharavi-Alkansari and B.H. Khalaj, "Peak to mean envelope power ratio of oversampled OFDM signals : an analytical approch," IEEE Int. Conference on Communications, ICC2001, 2001.
[SKY12] Skyguide, T. Letertre et al, "Caractérisation et classification des systèmes de transmissions radiofréquences," rapport de projet , Supélec, 2012.
[STA09] Statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Journal of Health Physics 97(3)*, pp. 257-259, 2009.
[THU06] G. Thuroczy, F. Molnar, J. Szabo, G. Janossy, N. Nagy, G. Kubinyi and J. Bakos, "Public Exposure to RF from installed sources: site measurements and personal exposimetry," EUCAP, Nice, France, November 2006
[UTE04] UTE/CEI61000, "Compatibilité électromagnétique (CEM) – Réglementation et normalisation," Recueil de normes, vol 1 et 2, 2004.
[UTE10] Guide UTE C99-132 "Protocole pour la mesure in-situ des champs magnétiques 50 Hz générés par les ouvrages de transport d'électricité," 2010.
[WIG10] Wireless Gigabit Alliance (WiGig) White paper, "Defining the Future of Multi-Gigabit Wireless Communications," 2010.
[WUN04] G. Wunder and K. Paterson, "Crest-Factor Analysis of carrier Interferometry MC-CDMA and OFDM Systems," *Proc. IEEE Intl. Symposium of Information Theory*, Chicago, ILL, USA, 2004.

[YAN05] W. Yan and S. Y. Ron Hui, "A Universal PSpice Model for HID Lamps," *IEEE Trans. On Industrial Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1594-1602, 2005.