

N°

UNIVERSITÉ DE LILLE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

MÉMOIRE

en vue d'obtenir

L'habilitation à diriger des recherches

Spécialité : Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications

Préparée à L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

Présentée et soutenue publiquement le 21 septembre 2018 à Villeneuve d'Ascq par :

Virginie DENIAU

CONTRIBUTION À LA PROTECTION DES SYSTÈMES COMMUNICANTS DANS LES TRANSPORTS FACE AUX INTERFÉRENCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Membres du Jury

<u>Rapporteurs :</u>	Flavio CANAVERO, Professeur, École Polytechnique de Turin Fabienne NOUVEL, Maître de conférences, HDR, INSA de Rennes Françoise PALADIAN, Professeure, Université de Clermont Ferrand
<u>Examineur :</u>	Marc HÉLIER, Professeur, Sorbonne Université, Paris
<u>Référent, invité :</u>	Marc HEDDEBAUT, Directeur de Recherche, retraité de l'IFSTTAR
<u>Membres invités :</u>	Bernard DEMOULIN, Professeur-Émérite, Université de Lille Philippe MASSY, Chef de la Division Innovation Développement Méthodes, SNCF-Réseau

Table des matières

I. RESUME	5
II. LISTE DES SIGLES	7
III. PREAMBULE ET REMERCIEMENTS	9
IV. SYNTHESE DE MON PARCOURS ET DE MES ACTIVITES	13
IV.1. Curriculum Vitae synthétique.....	13
IV.2. Publications.....	14
IV.2.1. Chapitres d'ouvrages	14
IV.2.2. Revues à comité de lecture.....	14
IV.2.3. Liste des brevets.....	15
IV.2.4. Communications à des colloques ou conférences en tant qu'invité	16
IV.2.5. Liste des publications dans des actes de colloques	16
IV.2.6. Communications orales sans actes dans un congrès international ou national	21
IV.3. Activités d'enseignement et d'encadrement	21
IV.4. Participation à des projets de recherche collaboratifs.....	25
IV.5. Activités communautaires et animations scientifiques	27
IV.6. Activités d'expertise	27
V. SYNTHESE DE MES ACTIVITES SCIENTIFIQUES	29
V.1. La problématique CEM dans le domaine des transports et de leur sécurité.....	29
V.2. Mes recherches sur les moyens et méthodologies d'essais.....	30
V.2.1. Les cellules TEM 3D	31
V.2.2. Les chambres réverbérantes à brassage de modes	37
V.2.2.1. S'affranchir de leurs limitations en basses fréquences	37
V.2.2.2. L'utilisation d'approches dans le domaine des temps en CRBM	40
V.2.2.3. Autres travaux sur les CRBM	50
V.2.3. Tests d'immunité des radio communications en modes conduits	50
V.2.3.1. Le système de communication GSM-R	51
V.2.3.2. Test de susceptibilité des radio communications GSM-R.....	53
V.3. La caractérisation des environnements EM transports	59
V.3.1. Caractérisation des perturbations EM rencontrées par les communications GSM-R.....	59
V.3.1.1. Travaux expérimentaux et statistiques pour la caractérisation des interférences EM agissant sur les communications GSM-R.....	60
V.3.1.2. Analyse des interférences reçues par les antennes en toiture du train en fonction de leur position	62
V.3.2. Caractérisation de la signature électromagnétique de l'infrastructure d'alimentation électrique ferroviaire	66
V.3.2.1. Une analyse temps-fréquences des signaux	69
V.3.2.2. La détection automatique des interférences EM transitoires.....	70
V.3.3. Outil d'analyse temps-fréquences dimensionné pour les problématiques de compatibilité	

électromagnétique	72
V.3.3.1. Utilisation de l'outil d'analyse temps-fréquences dans la bande du GSM-R.....	75
V.3.3.2. Utilisation de l'outil d'analyse temps-fréquences sur un signal eurobalise.....	76
V.3.3.3. Comparaison avec les résultats apportés par une transformée de Gabor	79
V.3.4. Classification de bruits électromagnétiques en fonction de leurs effets sur les transmissions numériques	81
V.4. Interférences EM intentionnelles et risques pour les transports	88
V.4.1. La vulnérabilité des transports face aux interférences EM intentionnelles	88
V.4.2. Etudes de vulnérabilité des protocoles de communication face aux interférences EM intentionnelles.....	88
V.4.2.1. Les interférences électromagnétiques intentionnelles considérées	89
V.4.2.2. Susceptibilité du GSM-R face aux signaux de brouillage	91
V.4.2.3. Susceptibilité du Wi-Fi face aux signaux de brouillage	92
V.4.3. La détection des signaux d'interférences EM intentionnelles	96
V.4.3.1. Détection de signaux de brouillage du GSM-R.....	97
V.4.3.2. Détection de signaux de brouillage du Wi-Fi	104
VI. PERSPECTIVES.....	111
VII. BIBLIOGRAPHIE	115
VIII. PUBLICATIONS ANNEXEES	121

I. Résumé

Ce mémoire d'HDR synthétise mes travaux depuis mon arrivée en 2004 à l'INRETS, devenu IFSTTAR en 2011, sur la compatibilité électromagnétique et les interférences électromagnétiques agissant sur le fonctionnement des équipements et systèmes de communication dans les transports. Dans ce mémoire, mes travaux de recherche sont organisés en trois principaux thèmes.

Le premier est dédié aux moyens et méthodologies de test des équipements et systèmes face à différentes contraintes électromagnétiques. Il contient des travaux sur les cellules TEM tridimensionnelles, les chambres réverbérantes à brassage de modes et des tests en mode conduit pour évaluer la susceptibilité de certains protocoles de communications.

Le second thème porte sur la connaissance et la caractérisation des environnements électromagnétiques dans les transports. Il présente des travaux expérimentaux, statistiques et de simulation qui ont été menés pour obtenir des modèles de ces environnements. Une partie de mes travaux sur ce thème concerne également les traitements et outils d'analyse temps-fréquences pour obtenir des représentations pertinentes des environnements électromagnétiques dans les moyens de transport, en considérant les systèmes embarqués à protéger.

Enfin, le troisième thème porte sur les interférences électromagnétiques intentionnelles peu puissantes (quelques W) pouvant être générées à l'encontre des systèmes de communication. Il comporte notamment des études de susceptibilité sur différents systèmes de communication en fonction des caractéristiques des interférences électromagnétiques et étudie différentes techniques de détection de ces interférences électromagnétiques intentionnelles.

II. Liste des sigles

Acronyme	Définition
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ANSSI	Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information
BER	Bit Error Rate
BTS	Base Transceiver Station
CAF	Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles
CCA	Clear Channel Assessment
CCF	Chamber Calibration Factor
CEM	Compatibilité électromagnétique
CEMRAIL	Compatibilité ÉlectroMagnétique entre l'infrastructure d'alimentation du système ferroviaire et les systèmes de communications sol-bord
CRBM	Chambre Réverbérante à brassage de modes
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
DIFS	DCF (Distributed Coordination Function) Interframe Space
d.s.p	Densité spectrale de puissance
EPST	Établissement Public à Caractère Scientifique et Technique
EST	Équipement sous test
EM	Electromagnétique
ERTMS	European Railway Traffic Management System
EVM	Error Vector Magnitude
FFT	Fast Fourier Transform
FSK	Frequency shift keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM-R	Global System for Mobile communications - Railways
GTEM	Giga-transverse électromagnétique
IDS	Intrusion Detection System
IEMI	Interférence électromagnétique intentionnelle
IEMN	Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie
IMT	Institut Mines Télécom
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
pdf	Fonction de densité probabiliste
RAILCOM	Electromagnetic compatibility between rolling stock and rail-infrastructure encouraging European interoperability
SECRET	SECurity of Railways against Electromagnetic aTtacks
SIR	Signal Interference Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
TEM	Transverse électromagnétique
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TREND	Test of Rolling Stock Electromagnetic Compatibility for cross-Domain interoperability
URSI	Union Radio Scientifique Internationale
UTAC	Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle
Wi-Fi	Wireless Fidelity

III. Préambule et remerciements

Ce manuscrit regroupe l'essentiel de mon activité de chercheuse depuis ma thèse soutenue en juin 2003. Depuis cette date et jusqu'à présent, j'ai travaillé en tant que chercheur en compatibilité électromagnétique au sein du laboratoire d'Électronique, Ondes et Signaux pour les Transports (LEOST) de l'EPST INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et de leur Sécurité) devenu IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies pour les Transport, l'Aménagement et les Réseaux) en 2011.

De juillet 2003 à décembre 2003, j'ai été post-doctorante. En janvier 2004, je suis entrée à l'INRETS en tant que chargée de recherche 2^{ème} classe et je suis passée chargée de recherche de 1^{ère} classe en janvier 2009.

Les travaux que j'ai menés au cours de cette période ont principalement concerné les moyens et procédures d'essais électromagnétiques dans les premières années, faisant suite à mes travaux de thèse. Puis, ayant eu rapidement l'opportunité de prendre part à des projets collaboratifs avec des industriels et des opérateurs du monde ferroviaire, j'ai pu travailler sur la caractérisation des environnements électromagnétiques transports et sur la mise œuvre de tests représentatifs en laboratoire. Ces opportunités, je les dois à certains collègues ou confrères tels que Bernard Démoulin, Marc Heddebaut et Marion Berbineau que je remercie. Enfin, sous l'impulsion des échanges et rencontres dans le cadre de ces différents projets, j'ai pu initier des travaux sur les interférences électromagnétiques intentionnelles de faibles puissances et leurs effets sur les systèmes de communication sans fils. Ces travaux débutés en 2011, ont été l'occasion de mettre en œuvre de toutes nouvelles collaborations pluridisciplinaires.

Les travaux et résultats présentés dans ce manuscrit sont évidemment issus de travaux collectifs menés avec des doctorants, des post-doctorants, des partenaires et des collègues. En particulier, Jean Rioult, ingénieur de recherche à l'IFSTTAR, a pris part à l'ensemble de ces travaux. Tous mes travaux ont bénéficié de ces compétences et de ses nombreuses idées. Il a été un partenaire indéfectible, capable de trouver et de mettre en œuvre des solutions techniques, même face aux problèmes de dernière minute souvent rencontrés lors des campagnes de mesures in situ. Ces nombreuses expérimentations in situ n'auraient pas donné des résultats si fructueux sans son implication. J'en profite donc pour lui exprimer toute ma gratitude et mon amitié.

J'ai encadré ou co-encadré 7 thèses, dont une d'entre elles est en cours de déroulement. J'ai débuté avec la thèse d'Aubry Picard sur la cellule TEM tridimensionnelle, pour laquelle j'ai apporté une contribution plutôt légère, et j'ai bénéficié de l'expérience de Bernard Démoulin qui assurait la direction. Pour les thèses de Nedim Ben Slimen et Stephen Dudoyer qui ont passé 100% de leur temps à l'INRETS, j'ai eu une implication beaucoup plus importante dans l'orientation et le déroulement des travaux. C'est dans le cadre de ces thèses que mon expérience des mesures in situ, de l'analyse des données, des méthodes de traitement des signaux recueillis et de leur pertinence selon les systèmes étudiés s'est développée. J'ai eu la chance d'être accompagnée par Bernard Démoulin, Marc Heddebaut et Sylvie Baranowski dans la direction de ces thèses, avec lesquels j'ai toujours pris plaisir à travailler. En effet, leurs compétences, leur disponibilité, leur exigence et leurs lectures attentives, ont toujours été

très rassurantes, garantissant la pertinence et la qualité des travaux. De plus, la thèse de Stephen Dudoyer a également bénéficié du co-encadrement de Sébastien Ambellouis, également du LEOST, donnant ainsi toute son originalité au sujet puisqu'il s'agissait d'exploiter des méthodes de classification pour ne détecter que les interférences potentiellement nuisibles au bon fonctionnement du système de communication GSM-R. Cette thèse fut la première thèse à co-encadrement pluridisciplinaire à laquelle j'ai pris part ; j'ai trouvé cette expérience particulièrement enrichissante. Par la suite, j'ai poursuivi sous cet angle pluridisciplinaire pour la thèse de Souhir Mili, qui a été co-encadrée par David Sodoyer. Il s'agissait d'exploiter des techniques d'analyse statistique pour détecter des interférences électromagnétiques intentionnelles. La thèse de Raouf Kousri a été financée par l'IRT Railenium et m'a donné l'opportunité de travailler sur un sujet qu'il aurait été plus difficile de développer dans le cadre d'un projet collaboratif. Ce sujet a été construit à partir des besoins récurrents que j'avais eus aux cours de mes recherches sur les outils d'analyse temps-fréquences. L'approche temps-fréquences que Raouf Kousri a développée dans sa thèse, est d'ailleurs régulièrement utilisée dans mes travaux actuels pour la surveillance des systèmes de communications sans fils. Ma contribution à la thèse de Grecia Romero est venue assez naturellement, en raison d'une collaboration avec Éric Simon du laboratoire IEMN-TELICE. Nous avons commencé à travailler ensemble, également avec Christophe Gransart, sur la vulnérabilité du système Wi-Fi aux interférences EM intentionnelles et ces travaux se sont poursuivis dans la thèse de Grecia Romero. Cette fois-ci, l'implication de Christophe Gransart apportant de nouvelles compétences, a permis de mener des analyses de susceptibilité en étudiant simultanément les couches physique et liaison de données. Actuellement, la collaboration avec Christophe Gransart me permet de traiter d'autres modes d'attaque dite « protocolaires » et de chercher à les détecter par la surveillance du lien physique. La thèse de Grecia Romero est également la première thèse que j'encadre rédigée en anglais. Enfin, la thèse d'Olivier Stienne a débuté en 2017 et se déroulera sur six ans car Olivier Stienne est enseignant et réalise sa thèse à mi-temps. Cette thèse, qui porte sur la susceptibilité du système de communication LTE (Long Term Evolution) aux interférences EM, poursuit ma collaboration avec Éric Simon qui dirige cette thèse.

Toutes ces thèses se sont déroulées idéalement, avec des échanges riches, des idées, des résultats et des soutenances dans les délais. Ceci grâce aux doctorants motivés et passionnés que je remercie pour leur implication et aux collègues qui ont assuré les directions de ces thèses avec curiosité scientifique, vigilance et disponibilité.

Ainsi, il me semblait légitime de rappeler que tous les résultats présentés dans ce manuscrit sont les productions collectives de toutes ces personnes.

L'intérêt de certains résultats présentés dans ce manuscrit réside en outre, dans le fait qu'ils sont basés sur des expérimentations ou des mesures réalisés dans des conditions dites « in situ » (à bord des trains, en station d'alimentation électrique, dans des conditions opérationnelles variables...). Ainsi, ces résultats ont pu être obtenus grâce au contexte collaboratif et aux efforts de certains partenaires pour nous donner accès à des conditions de mesures exceptionnelles.

En particulier, je dois citer les efforts de Stefan Niska de Trafikverket, dans le cadre du projet européen TREND (Test of Rolling Stock Electromagnetic Compatibility for cross-Domain interoperability), pour nous avoir permis de procéder à des mesures lorsque la caténaire est recouverte de glace. Il a dû organiser des mesures de nuit au nord de LULEA avec un dispositif

vaporisant de l'eau sur la caténaire avant chaque passage de train pour qu'elle soit recouverte de givre. Toujours dans le projet TREND, Joseba Rodriguez de la société CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles), a organisé une campagne d'essais « sur mesure ». Celle-ci visait à maîtriser au mieux la topologie et produire des arcs dans des conditions fixes par décrochage et raccrochage du pantographe et ce malgré les réticences des autres personnels.

Je pense également à Nicole Dubalen, Philippe Massy, Alain Rault et Henri Philippe de la SNCF qui ont toujours tout mis en œuvre pour nous permettre de procéder à des mesures à bord des trains, en gare, dans différentes conditions de vitesse et sur différents systèmes (GSM-R, TETRA...). Plusieurs campagnes de mesures ont eu lieu grâce à ces personnes dans le cadre de projets mais également en dehors de projet, où ils nous ont offert des opportunités de nous greffer à leurs essais.

Enfin, je dois remercier plusieurs personnes d'Alstom. Gérald Nottet nous a permis à plusieurs reprises de mener des mesures en sous-station ferroviaire, au centre d'essais ferroviaire de Petite-Forêt et d'accéder à des trains lorsqu'ils étaient de passage pour de la maintenance au centre de Petite-Forêt. Benoit Meyniel, Renaud Comte et Pierre Lambert nous ont fournis des équipements ferroviaires spécifiques pour nos expérimentations et nous ont permis d'accéder aux terminaux radio installés dans leurs locaux ainsi qu'aux BTS d'essais dont ils disposaient. L'intervention de ces personnes a permis de fournir des données au-delà de ce qu'on peut obtenir en laboratoire, confrontant ainsi les doctorants à des conditions ou équipements opérationnels.

Tous les projets collaboratifs auxquels j'ai participé ont été très enrichissants, en raison des problèmes traités et des rencontres qu'ils ont provoquées. L'un d'entre a été plus particulier pour moi puisqu'il s'agit d'un projet européen du FP7 que j'ai coordonné. Il s'agit du projet SECRET pour « Security of Railways against Electromagnetic Attacks ». Ce projet a été une aventure scientifique et relationnelle forte et mémorable. Il a abouti à des démonstrations collectives dans lesquelles tous les partenaires se sont impliqués considérablement et par conséquent, je tiens à tous les remercier. Cependant, si j'ai pu assurer une coordination scientifique efficace, c'est grâce aux soutiens administratif et scientifique que j'ai reçus à l'IFSTTAR. En particulier, je remercie tout particulièrement Stéphane Laporte qui s'est impliqué énormément et a fait preuve d'une vigilance continue. Il a souvent adopté le « mauvais rôle » pour éviter toute dérive au cours du projet. Je remercie également Marc Heddebaut, Jean Rioult, El Miloudi El Koursi et Erik Bessman sur lesquels j'ai pu compter en permanence lors des moments plus ou moins difficiles que l'on rencontre lorsqu'on coordonne un projet. Et enfin, je remercie Fabienne Molinari pour son professionnalisme exemplaire et ses compétences indispensables au bon suivi administratif d'un projet européen.

Ainsi, ce préambule met en lumière la dimension collective de mes travaux pour que le lecteur garde à l'esprit que les résultats présentés dans ce mémoire constituent la production de toutes ces personnes.

Le chapitre 4 de ce mémoire qui suit ce préambule, représente une synthèse de mon parcours et de mes activités. Il donne un aperçu global de mes productions, de mes activités d'enseignement, de mes implications dans différents projets ou expertises et de ma participation à certains réseaux ou communautés scientifiques. Les résultats de mes travaux sont organisés en trois sections principales constituant le chapitre 5. Après une introduction

à la CEM dans le domaine des transports, une première section est dédiée à mes travaux portant sur les moyens et les méthodologies d'essais électromagnétiques. Une seconde section décrit mes travaux sur la caractérisation des environnements électromagnétiques transport, et la troisième section présente mes travaux sur les interférences électromagnétiques intentionnelles de faibles puissances pouvant impacter les systèmes de communication sans fils. Enfin, ce mémoire se clôture par le chapitre 6, dédié à mes perspectives de recherche.

IV. Synthèse de mon parcours et de mes activités

IV.1. Curriculum Vitae synthétique

État Civil

Virginie Deniau

Née le 6 mai 1974 à Mantes-La-Jolie (78)

Mariée, 2 enfants nés en 2005 et 2007

Formation et Parcours professionnel

Depuis janvier 2009	Chargée de Recherche 1 ^{ère} classe
Janvier 2004-janvier 2009	Chargée de recherche 2 ^{ème} classe à l'INRETS-LEOST
Juin 2003-décembre 2003	Post-doctorante à l'INRETS-LEOST
Novembre 2000 - juin 2003	Doctorat d'Électronique, INRETS-LEOST/IEMN-TELICE
Septembre 1999 - juin 2000	DEA d'Électronique de l'Ecole Doctorale de l'USTL.
Septembre 1998- Juin 1999	Maîtrise d'Électronique, d'Électrotechnique et d'Automatique (E.E.A.) avec spécialité Électronique à l'USTL.
1993-1998	Baccalauréat C à Évreux (27), Deug A – majeure physiques et Option EEA à Cherbourg (50), Licence E.E.A. à Caen (14).

Thèmes de recherche développés

- Compatibilité Électromagnétique
- Caractérisation des environnements électromagnétiques transport
- Moyens et méthodologies d'essais électromagnétiques pour les infrastructures, les véhicules et équipements embarqués
- Comportement EM des équipements et systèmes électriques et électroniques en termes d'émissions rayonnées et conduites
- Immunité et susceptibilité électromagnétiques des protocoles de télécommunication, des équipements et systèmes électroniques et de transmissions
- Détection d'interférences EM intentionnelles dans des environnements EM complexes

IV.2. Publications

IV.2.1. Chapitres d'ouvrages

1. S. Dudoyer, V. Deniau, N. Ben Slimen, R. Adriano, Susceptibility of the GSM-R Transmissions to the Railway Electromagnetic Environment, Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), chap. 20, pp. 503-522, 2012, ISBN : 978-953-51-0448-3, InTech, Available from : <http://www.intechopen.com/books/infrastructure-design-signalling-and-security-in-railway/susceptibility-of-the-gsm-r-transmissions-to-the-railway-electromagnetic-environment>.
2. N. Ben Slimen, A. De Bernadinis, V. Deniau, J. Kouv, Z. Khatir, Innovations dans les transports guidés urbains et régionaux, Edition Hermès, chapitre Aspects énergétiques et électriques, pp. 35-81, 2010.

IV.2.2. Revues à comité de lecture

1. M. Heddebaut, V. Deniau, J. Rioult, Wideband analysis of railway catenary line radiation and new applications of its unintentional emitted signals, Measurement Science and Technology, IOP Publishing Ltd, Vol. 29, Issue: 6, 2018.
2. V. Deniau, C. Gransart, G. L. Romero, E. P. Simon, J. Farah, IEEE 802.11n Communications in the Presence of Frequency-Sweeping Interference Signals, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, Issue: 5, pp. 1625-1633, 2017.
3. M. R. Kousri, V. Deniau, M. Heddebaut, S. Baranowski, Evaluation of the Impact of Transient Disturbances on Railway Signaling Systems Using an Adapted Time-Frequency Analysis Method, International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 63, Issue: 4, pp. 347-354, 2017.
4. M. Heddebaut, V. Deniau, J. Rioult, C. Gransart, Mitigation Techniques to Reduce the Vulnerability of Railway Signaling to Radiated Intentional EMI Emitted From a Train, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, Issue: 3, pp. 845 - 852, 2017.
5. M. R. Kousri, V. Deniau, M. Heddebaut, S. Baranowski, Evaluating Electromagnetic Railway Environment Using adaptive Time-Frequency Analysis (Paper ID : IJETR/04/1404). International Journal of Engineering and Technical Research, ISSN: 2321-0869 (O), Vol.4, Issue: 3, pp. 2454-4698, 2016.
6. V. Deniau, P. Massy, A. Kung, R. Comte, M.H. Bonneau, SECRET – SECURITY of the Railway network against Electromagnetic ATtacks, European Railway Review, Rail Safety & Security supplement, Vol. 21, Issue: 1, pp. 58-60, 2015.
7. S. Mili, V. Deniau, D. Sodoyer, M. Heddebaut, S. Ambellouis, Jamming Detection Methods to Protect Railway Radio Communication. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Vol. 4, Issue: 7, pp. 71-77, 2015.
8. V. Deniau, Overview of the European Project Security of Railways in Europe against Electromagnetic Attacks (SECRET), IEEE magazine on Electromagnetic Compatibility, Vol. 3, Issue: 4, pp. 80-85, 2015.
9. S. Mili, D. Sodoyer, V. Deniau, M. Heddebaut, Detection of electromagnetic jamming signals interfering with a railway track-to-train radio communication, Journal of telecommunications Vol. 27, Issue: 2, 2014.
10. S. Dudoyer, V. Deniau, S. Ambellouis, M. Heddebaut, A. Mariscotti, Classification of Transient EM Noises Depending on their Effect on the Quality of GSM-R Reception, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, Issue: 5, pp. 867-874, 2013.

11. S. Mili, D. Sodoyer, V. Deniau, M. Heddebaut, Modeling and analysis of railway GSMK reception vulnerability to electromagnetic interference, *International Journal of Advanced Computer Science and Technology (IJACST)*, IJACST journal, Vol. 2, Issue: 7, pp. 115-118, 2013.
12. S. Dudoyer, V. Deniau, R. Adriano, M. N. Ben Slimen, J. Rioult, B. Meyniel, M. Berbineau, Study of the Susceptibility of the GSM-R Communications to the Electromagnetic Interferences of the Rail Environment, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 54, Issue: 3, pp. 667 – 676, 2012.
13. G. Boschetti, A. Mariscotti, V. Deniau, Assessment of the GSM-R susceptibility to repetitive transient disturbance, *Measurement*, Vol. 45, Issue: 9, pp. 2226-2236, 2012.
14. N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer and S. Baranowski, Statistical characterisation of the EM interferences acting on GSM-R antennas fixed above moving train, *European Physical Journal – Applied physics*,. Vol. 48, Issue: 2, pp. 1-7, 2009.
15. J. Rioult, M. Heddebaut, D. Seetharamdoo, V. Deniau, Real-Time 3D electromagnetic field measurement instrument with direct visualization, *Comptes Rendus Physique*, 2009, doi: 10.1016/j.crhy.2008.12.006.
16. F. Rouissi, O. Delangre, V. Degardin, M. Lienard, M. Heddebaut, V. Deniau, P. Degauque, Intra-vehicle digital communications: characterization and simulation of the electromagnetic environment, *Comptes Rendus de Physique*, Vol. 10, Issue: 1, pp. 13-21, 2009, doi : 10.1016/j.crhy.2008.12.003.
17. V. Deniau, N. Ben Slimen, S. Baranowski, H. Ouaddi, J. Rioult , N. Dubalen, Characterisation of the EM Disturbances Affecting the Safety of the Railway Communication Systems, *European Physical Journal –Applied physics*, Vol. 43, pp. 225-230, 2008.
18. M. Heddebaut, V. Deniau, K. Adouane, In-Vehicle WLAN Radio Frequency Communication Characterization, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, Issue: 2, pp. 114-121, 2004.
19. V. Deniau, J. Rioult, Phase Stirring of Electromagnetic Field to Test the Susceptibility of Electronic Equipments in Lower Frequencies, *Institute of Physics Publishing, Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 2048-2055, 2006.
20. M. Klingler, V. Deniau, S. Egot, B. Démoulin, S. Ficheux, Chambres réverbérantes à brassage de modes, Extension vers les basses fréquences, *Revue Essais Industriels*, 2002.

IV.2.3. Liste des brevets

1. J. Rioult, M. Heddebaut, J.P. Ghys, V. Deniau, Localisation d'une source de rayonnement électromagnétique sur un équipement électrique, INRETS, Application number FR20040006225 20040609, 16/12/2005, https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=3&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20051216&CC=FR&NR=2871580A1&KC=A1#
2. J. Rioult, M. Heddebaut, V. Deniau, Dispositif de mesure du champ électromagnétique émis par un appareil sous test, INRETS, Application number US S20070517141 20071115, 22/04/2010, https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100422&CC=US&NR=2010097236A1&KC=A1#
3. V. Deniau, N. Ben Slimen, J. Rioult, Générateur de scénario de bruit électromagnétique, INRETS, Application number CN20098135317 20090710, 28/09/2011, https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20110928&CC=CN&NR=102204151A&KC=A#

4. M. Heddebaut, V. Deniau, J. Rioult, Générateur d'énergie électrique, alimentation électrique, capteur comportant une telle alimentation électrique, Application number EP20140157452 20140303, 03/09/2014, https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20140903&CC=EP&NR=2773010A1&KC=A1#

IV.2.4. Communications à des colloques ou conférences en tant qu'invité

1. V. Deniau, Protection du réseau ferroviaire : Proposer des solutions de surveillance et de résilience face aux attaques cybernétiques, Intervention lors de la Conférence sur la sécurité numérique organisée par l'EPSF, Paris, décembre 2017.
2. V. Deniau, Projet européen SECRET : Protection du réseau ferroviaire contre les attaques électromagnétiques, XXIème forum NTIC, Sûreté et Sécurité dans les transports, Paris, 9 décembre 2015.
3. V. Deniau, Threats and opportunities for security: the SECRET Project, second UIC GSM-R World Conference, Paris, 15-16 septembre 2015.
4. V. Deniau, Noël Haddad, nouveaux défis CEM dans le ferroviaire, journée thématique CEM et Mobilité CEM 2014 Clermont Ferrand, 30 juin 2014.
5. V. Deniau, SECRET/ SECURITY of Railways against Electromagnetic aTtacks, 9ème congrès mondial UIC sur la sûreté ferroviaire, Paris, novembre 2013.
6. V. Deniau, L. Koné, J. Rioult, S. Baranowski, Utilisation des CRBM en mode temporel : illustration par des mesures d'efficacité de blindage, conférence CEM, Salon Microwave & RF, Paris, 4 avril 2012.
7. V. Deniau, Effets des perturbations électromagnétiques produites par le contact glissant caténaire-pantographe sur la qualité des communications GSM-R, journée d'étude du groupe de contact FNRS « Electronique de puissance », Université de Liège, 17 mars 2010.
8. V. Deniau, N. Ben Slimen, S. Dudoyer, R. Adriano, J. Rioult, P. Massy, A. Raux, B. Meyniel, Characteristics of Electromagnetic noises produced by the sliding contact catenary - pantograph and impacts on the GSM-R transmissions, Workshop on Power Transmission in High Speed Railway Systems, Amiens, décembre 2009.
9. V. Dégardin, M. Heddebaut, M. Liénard, V. Deniau, P. Degauque, Bruits électromagnétiques au sein de véhicules Routiers et conséquences sur les systèmes de communications Numériques, Colloque CEM 2008, Paris, mai 2008.
10. N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Baranowski, B. Démoulin, Caractérisation du bruit électromagnétique dans les bandes dédiées aux télécommunications entre les trains et les centres de contrôle du trafic ferroviaire : mesure à bord d'un train en mouvement, exposés sollicités, réunion plénière « interférences d'ondes » du GDR ondes, Bordeaux, novembre 2007.
11. V. Deniau, J. Rioult, D. Delcourt, J.P. Ghys, La cellule TEM tridimensionnelle : un nouveau moyen d'essais pour les tests de CEM aux perturbations rayonnées en basses fréquences, CEM EXPO 2004, Genocentre d'Evry, 23-24 novembre 2004.

IV.2.5. Liste des publications dans des actes de colloques

1. O. Stienne, V. Deniau, E. Simon, Susceptibility of 4G communications in railway EM environment, URSI AT-RASC 2015, Gran Canaria, Spain, mai 2018.

2. G. Romero, V. Deniau, Mitigation Technique to Reduce the Wi-Fi Susceptibility to Jamming Signals, URSI AT-RASC 2015, Gran Canaria, Spain, mai 2018.
3. M. R. Kousri, V. Deniau, M. Heddebaut, S. Baranowski, Outil d'analyse temps-fréquences adapté aux problématiques CEM du milieu ferroviaire, 18ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique, Rennes, juillet 2016.
4. J. Rioult, M. Heddebaut, V. Deniau, L. Koné, G. Copin, Visualisation optique directe de phénomènes de propagation en chambre réverbérante à brassage de modes, 18ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique, Rennes, juillet 2016.
5. M. R. Kousri, V. Deniau, S. Baranowski, M. Heddebaut, J. Rioult, Time-Frequency Processing Adapted for the Different Electromagnetic Compatibility Issues in the Railways Domain, Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe 2015, Dresden, Allemagne, septembre 2015.
6. M. Heddebaut, V. Deniau, J. Rioult, G. Copin, S. Mili, Method for Detecting Jamming Signals Superimposed on a Radio Communication - Application to the Surveillance of Railway Environments, Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe 2015, Dresden, Allemagne, septembre 2015.
7. S. Mili, V. Deniau, D. Sodoyer, M. Heddebaut, Statistical modeling of the GSM-R electromagnetic environment for jamming detection. URSI AT-RASC 2015, Gran Canaria, Spain, mai 2015.
8. M. R. Kousri, V. Deniau, S. Baranowski, M. Heddebaut, J. Rioult, Time Frequency Processing Dedicated to Electromagnetic Compatibility Issues in the Railway Domain, URSI AT-RASC, Gran Canaria, Spain, mai 2015.
9. M. Heddebaut, S. Mili, D. Sodoyer, E. Jacob, M. Aguado, C. Pinedo Zamalloa, I. Lopez, V. Deniau, Towards a resilient railway communication network against electromagnetic attacks, Transport Research Arena 2014, Paris, avril 2014.
10. V. Beauvois, M. Fontana, V. Deniau, F. Canavero, Jamming Signal Immunity Tests on GSM-R Communications Compared to EMC Standards, AMEREM2014, Albuquerque, Etats-Unis, juillet 2014.
11. S. Mili, V. Deniau, D. Sodoyer, M. Heddebaut, Detection of railway signalling jamming signals using the EVM method, AMEREM2014Albuquerque, États-Unis, juillet 2014.
12. M. Heddebaut, V. Deniau, J. Rioult, Récupération d'énergie électromagnétique parasite en voie ferroviaire, CEM 2014, 17e Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique, Clermont Ferrand, France, juillet 2014.
13. J. Rioult, M. Heddebaut, S. Ambellouis, A. Flanquart, V. Deniau, Cartographie rapide d'un plan dans l'espace à l'aide d'une Kinect, CEM 2014, 17e Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique, Clermont Ferrand, France, juillet 2014.
14. S. Mili, V. Deniau, D. Sodoyer, M. Heddebaut, Détecter la présence d'un brouilleur en étudiant les représentations en quadrature des signaux de communication, CEM 2014, 17e Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique, Clermont Ferrand, France, juillet 2014.
15. S. Mili, D. Sodoyer, V. Deniau, M. Heddebaut, H. Philippe, F. Canavero, Recognition process of jamming signals superimposed on GSM-R radio communications, EMC Europe 2013, pp. 45 – 50, Bruges, Belgique, septembre 2013.
16. V. Deniau, H. Fridhi, M. Heddebaut, J. Rioult, I. Adin, J. Rodriguez, Analysis and modelling of the EM interferences produced above a train associated to the contact between the catenary and the pantograph, EMC Europe 2013, Bruges, Belgique, septembre 2013.

17. H. Fridhi, V. Deniau, J.P. Ghys, M. Heddebaut, J. Rodriguez, I. Adin, Analysis of the coupling path between transient EM interferences produced by the catenary-pantograph contact and on-board railway communication antennas, ICEAA2013, Digital Object Identifier : 10.1109/ICEAA.2013.6632310, pp. 587-590, Turin, Italy, septembre 2013.
18. V. Deniau, S. Dudoyer, M. Heddebaut, A. Mariscotti, A. Marrese, N. Pasquino, Test bench for the evaluation of GSM-R operation in the presence of electric arc interference, Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), Bologna, Italie, octobre 2012.
19. S. Mili, V. Deniau, D. Sodoyer, M. Heddebaut, Modeling of a GSM-R receiving chain exposed to transient IEMIs, EUROEM2012, Toulouse, juillet 2012.
20. V. Deniau, S. Dudoyer, S. Ambellouis, M. Heddebaut, A. Mariscotti, Research of observables adapted to the analysis of EM noise impacting the quality of GSM-Railway transmissions, EMC Europe 2012, Rome, septembre 2012.
21. S. Baranowski, H. Ouaddi, V. Deniau, J. Rioult, G. Nottet, Modelisation of EM Field Radiated by Catenaries and Due to the Railway Power System, 5p, EMC Europe 2012, Rome, Italie, septembre 2012.
22. V. Deniau, J. Rioult, S. Baranowski, H. Ouaddi, G. Nottet, Measurements and Post-Processing for Achievement of Electromagnetic Transient Interference Models, 5p, EMC Europe 2012, Rome, Italie, septembre 2012.
23. S. Dudoyer, V. Deniau, S. Ambellouis, M. Heddebaut, A. Mariscotti, Recherche de descripteurs adaptés à l'analyse du bruit EM agissant sur la qualité des transmissions GSM-R, CEM 2012, Rouen, avril 2012 (Prix de la meilleure présentation).
24. J. Rioult, G. Copin, V. Deniau, D. Seetharamdoo, J. L. Darroman, S. Brioul, M. Heddebaut, Scanner Champ Proche Direct à Haute Résolution, CEM 2012, Rouen, avril 2012.
25. G. Boschetti, A. Mariscotti, V. Deniau, Pantograph Arc Transients Occurrence and GSM-R Characteristics, IMEKO TC4 and IX Semetro, Natal, Brésil, septembre 2011.
26. V. Deniau, L. Koné, M. Ayad, B. Renoncourt, J. Rioult, Study of pulse waveforms for testing in Mode Stirred Reverberating Chamber, EMC Europe 2011, pp. 778-783, York, UK, septembre 2011.
27. S. Dudoyer, N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau, Reliability of the GSM-R Communication System against Railway Electromagnetic Interferences, 9th World Congress on Railway Research WCRR 2011, Lille, France, mai 2011.
28. S. Dudoyer, V. Deniau, M. Ayad, M. Heddebaut, Analyse d'environnements électromagnétiques transport à l'aide de transformations temps-fréquences, TELECOM2011 & 7ème JFMMA, Tanger, Maroc, mars 2011.
29. M. Ayad, H. Ouaddi, V. Deniau, S. Baranowski, J. Rioult, G. Nottet, Caractérisation et modélisation des émissions EM rayonnées par les lignes d'électrification ferroviaires, TELECOM2011 & 7ème JFMMA, Tanger, Maroc, mars 2011.
30. J. Rioult, G. Copin, N. Ben Slimen, V. Deniau, N. Idir, A. Buonomo, S. Baranowski, Technique d'imagerie adaptée à la visualisation du champ EM rayonné par un objet sous test, TELECOM2011 & 7ème JFMMA, Tanger, Maroc, mars 2011.
31. A. Mariscotti, V. Deniau, On the characterization of pantograph arc transients on GSM-R antenna, IMEKO TC4 2010, Kosice, Slovaquie, septembre 2010.
32. T. Hammi, S. Baranowski, V. Deniau, J. Rioult, H. Ouaddi, G. Nottet, M. Ayad, Characterisation of the EM disturbances produced by railway substations by time-frequency analyses, EMC Europe 2010, Wroclaw, Pologne, septembre 2010

33. S. Dudoyer, V. Deniau, N. Ben Slimen, J. Rioult, B. Meyniel, Comparaison entre différentes méthodologies de Test d'immunité des transmissions GSM-R, CEM2010, Limoges, France, 2010.
34. P. Mariage, V. Deniau, D. Seetharamdoo, J. Rioult, Analysis of electromagnetic pollution radiated due to embedded 802.11a/b/g equipments both inside and outside railway vehicles, ITST 2009, Lille, France, 2009.
35. T. Hammi, N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer, Comparison between GSM-R coverage level and EM noise level in railway environment, ITST 2009, Lille, France, 2009.
36. S. Dudoyer, R. Adriano, V. Deniau, N. Ben Slimen, B. Meyniel, Testing of the GSM-R System against Electromagnetic Disturbances present in the Railway Environment, ITST 2009, Lille, France, 2009.
37. J. Rioult, D. Seetharamdoo, M. Heddebaut, V. Deniau, GYROSCANFIELD : Visualiser en 3D et en temps réel le rayonnement électromagnétique d'un objet sous test, journée GDR Ondes, Lausanne, février 2009.
38. R. Adriano, N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau, P. Massy, Prediction of the BER on the GSM-R communications provided by the EM transient disturbances in the railway environment, EMC Europe 2008, pp. 771-775, Hamburg, Allemagne, septembre 2008.
39. J. Rioult, M. Heddebaut, V. Deniau, D. Seetharamdoo, Dispositif temps réel de visualisation 3D de l'amplitude du champ électromagnétique rayonné par un objet sous test, CEM2008, Paris, mai 2008.
40. N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau, R. Adriano, S. Baranowski, P. Massy, Analyse temporelle des perturbations transitoires observées à bord d'un train en mouvement afin de protéger les systèmes de communication embarqués, CEM2008, Paris, mai 2008.
41. R. Adriano, N. Ben Slimen, V. Deniau, Hipólito de Jesus Luiz Le Roy, A. Vasconcelos João, Efeitos de Interferências Eletromagnéticas Discontínuas em Sistemas de Comunicações Digitais, Momag 2008, Santa Catarina, Brésil, 2008.
42. N. Ben Slimen, V. Deniau, S. Baranowski, N. Dubalen, B. Démoulin, Consortium RAILCOM, on-board measurements of the railway's electromagnetic noise with moving trains, EMC Zurich 2007, Munich, septembre 2007.
43. S. Leman, L. Koné, V. Deniau, S. Baranowski, B. Démoulin, Improvement of the Reverberation Chamber performances below the Starting Frequency, conférence invitée à PIERS2007 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, août 2007.
44. V. Deniau, J. Rioult, N. Ben Slimen, H. Ouaddi, N. Dubalen, RAILCOM consortium, Characterisation of the electromagnetic disturbances received by GSM-R antennas in usual railway operating conditions, EMC workshop, Paris, juin 2007.
45. V. Deniau, N. Ben Slimen, S. Baranowski, H. Ouaddi, J. Rioult, N. Dubalen, Characterisation of the EM Disturbances Affecting the Safety of the Railway Communication Systems, Reliability in Electromagnetics Systems organised by The Institution of Engineering and Technology, Paris, mai 2007.
46. N. Ben Slimen, L. Koné, B. Démoulin, V. Deniau, Évaluation de la sensibilité d'un circuit électronique exposé à une onde électromagnétique plane, Colloque International TELECOM'2007 & 5ème JFMMA, Fes, Maroc, mars 2007.
47. H. Ouaddi, V. Deniau, L. Koné, J. Rioult, Impact de la configuration d'essai lors d'émissions rayonnées en chambre réverbérante à brassage de modes et en chambre anéchoïque, Colloque International TELECOM'2007 & 5ème JFMMA, Fes, Maroc, mars 2007.
48. V. Deniau, J. Rioult, J.P. Ghys, S. Bazzoli, An Immunity Test Bench Generating a Perturbation of Variable Polarization in the Lower Frequencies, 7th International Symposium on Electromagnetic

Compatibility, EMC Europe 2006, Barcelone, Espagne, septembre 2006.

49. A. Picard, F. Fouquet, V. Deniau, A. Louis, B. Mazari, B. Démoulin, Perturbations induites par un câble de servitude lors de la mesure en cellule TEM tridimensionnelle, CEM06, Saint Malo, avril 2006.
50. M. Heddebaut, Ch. Gransart, J. Rioult, V. Deniau, WxAN communication effectiveness inside vehicle bodies in presence of passengers, EMC Roma, Italie, septembre 2005.
51. V. Deniau, J. Rioult, B. Démoulin, S. Ficheux, J.P. Ghys, Utilisation des propriétés des cellules TEM au sein d'une chambre réverbérante, JFMMA, rabat, Maroc, mars 2005.
52. V. Deniau, J. Rioult, Generation of Variable Polarisation Electromagnetic Field in a Three-Dimensional TEM Cell, IEEE Symposium on embedded EMC, Rouen, septembre 2005.
53. V. Deniau, M. Klingler, B. Démoulin, J. Rioult, S. Ficheux, J-P. Ghys, Electromagnetic Radiation Measurements in Two Specific Models of Three-Dimensional TEM cells, 16th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on EMC, Topical meeting pp. 165-170, Zurich, Suisse, février 2005.
54. V. Deniau, J. Rioult, D. Delcourt, J.P. Ghys, La cellule TEM tridimensionnelle : un nouveau moyen d'essais pour les tests de CEM aux perturbations rayonnées en basses fréquences, Session Modélisation et Outils de Conception CEM, Composants et Solutions Techniques, CEMEXPO 2004, 10p, Paris, France, novembre 2004.
55. V. Deniau, J. Rioult, D. Delcourt, Immunity Testing in Three-Dimensional TEM Cells, 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2004, Vol. 2, pp. 711-716, Eindhoven, Pays-Bas, septembre 2004.
56. V. Deniau, Optimization of three-Dimensional TEM Cell for Electromagnetic Compatibility Testing, ACES symposium, Syracuse, Etats-Unis, avril 2004.
57. V. Deniau, M. Heddebaut, J. Rioult, La cellule TEM tridimensionnelle : un nouveau moyen d'essais électromagnétique pour les tests de CEM en basses fréquences, journées scientifiques « Métrologie et capteurs en électromagnétisme » et assemblée générale du CNFRS (Comité National Français de Radioélectricité Scientifique, section française de l'Union Radio-Scientifique Internationale « URSI »), observatoire de Meudon, mars 2004.
58. V. Deniau, R. Perrot, M. Heddebaut, B. Démoulin, J. Rioult, Extension de l'utilisation d'une chambre réverbérante à brassage de modes en basses fréquences et en mode TEM, 7ème salon International des Laboratoires d'Essais, ASTELAB 2003, Paris, mars 2003.
59. V. Deniau, J. Rioult, M. Heddebaut, B. Démoulin, M. Klingler, Comparison between Reflection S-Parameters Measurements in Reverberating Chamber and in Free space at Lower frequencies – 15th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on EMC, Zurich, Suisse, février 2003.
60. V. Deniau, J. Rioult, M. Heddebaut, B. Démoulin, Radiated Power Measurements of Electronic Equipments in Three-Dimensional TEM Cells and in Conventional TEM Cells, EMC Compo 2002, Toulouse, novembre 2002.
61. V. Deniau, M. Klingler, B. Démoulin, Research of the Optimal Dimensions and Position of the Plates in a 3D-TEM Cell, 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2002, Sorrento, Italie, septembre 2002.
62. V. Deniau, J. Rioult, M. Klingler, B. Démoulin, T.K. Sarkar, Theoretical Simulation of Electromagnetic Behaviour of a Three-Dimensional TEM Cell Functioning in Resonance, 27th General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), Maastricht, Pays-Bas, août 2002.
63. M. Klingler, V. Deniau, J. Rioult, B. Démoulin, T.K. Sarkar, Design of a Three-Dimensional TEM cell for Radiated Power Measurements, 2002 IEEE International Symposium on Antennas and

Propagation, San Antonio, Texas, juin 2002.

64. M. Klingler, V. Deniau, S. Egot, B. Démoulin, T. Sarkar, Measuring Radiation of Small Electronic Equipment in Three-Dimensional TEM Cells, 10th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging (EPEP 2001), Cambridge, Massachusetts, octobre 2001.
65. M. Klingler, V. Deniau, S. Egot, B. Démoulin, S. Ficheux, Extension des propriétés des chambres réverbérantes à brassage de modes vers les basses fréquences, Colloque International TELECOM'2001 & 2ème JFMMA, Casablanca, octobre 2001.
66. V. Deniau, M. Klingler, B. Démoulin, Characterization of Cubic Three-Dimensional TEM Cells, Colloque International TELECOM'2001 & 2ème JFMMA, Casablanca, octobre 2001.
67. M. Klingler, V. Deniau, S. Egot, B. Démoulin, S. Ficheux, Extension des propriétés des chambres réverbérantes à brassage de modes vers les basses fréquences, 6ème salon International des Laboratoires d'Essais, ASTELAB 2001, Paris, Mars 2001.
68. M. Klingler, V. Deniau, L. Koné, B. Démoulin, B. Kolundzia, Characterization of Direct Electromagnetic Coupling Occurring in the Vicinity of the Lower Modes in Reverberation Chambers, 14th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on EMC, Zurich, Suisse, février 2001.

IV.2.6. Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

1. V. Deniau, Protection du réseau ferroviaire : Proposer des solutions de surveillance et de résilience face aux attaques cybernétiques, Conférence sur la sécurité ferroviaire organisée par l'EPSF, Paris, décembre 2017.
2. V. Deniau, P. Lambert, M.H. Bonneau, SECRET SECurity of Railways against Electromagnetic aTtacks: Focus on the white paper, UIC Security Week, Paris, juin 2016.
3. V. Deniau, Threats and opportunities for security: the SECRET Project, 2nd UIC World GSM-R Conference, Paris, UIC, septembre 2015.
4. V. Deniau, SECurity of Railways against Electromagnetic aTtacks, Workshop ARGUS, UIC, Paris, janvier 2015.

IV.3. Activités d'enseignement et d'encadrement

- Enseignements

Depuis 2003, j'assure chaque année 7 heures de cours de compatibilité électromagnétique à l'Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN) de Lille, auprès des étudiants de dernière année du cycle ingénieur.

En 2011 et 2012, j'ai également assuré 20 heures par année de TD de CEM pour la section GEII de l'IUT A de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, en remplacement d'une personne partie en retraite.

Depuis 2016, je donne un cours sur les systèmes de communication et les interférences EM intentionnelles en commun avec Éric Simon de l'Université de Lille 1, dans le cadre du Master SEMBA.

- Co-Encadrements de thèses

Table 1 : Liste des thèses encadrées

Nom du doctorant et université	Dates de démarrage et de soutenance	Titre de la thèse
PICARD Aubry Université de Rouen	1 avril 2004 6 juillet 2007	Analyse du couplage électromagnétique produit par un objet installé dans une cellule TEM 3D
BEN SLIMEN Nedim Université des Sciences et Technologies de Lille	1 décembre 2006 18 décembre 2009	Recherche de procédures de caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des systèmes de communications embarqués
DUDOYER Stephen Université des Sciences et Technologies de Lille	1 septembre 2010 16 septembre 2013	Méthode de détection et de reconnaissance de bruits électromagnétiques permettant la prédiction de leurs effets sur les transmissions GSM-R
MILI Souhir Université des Sciences et Technologies de Lille	1 octobre 2011 21 octobre 2014	Caractérisation de l'environnement électromagnétique transport pour la reconnaissance de conditions électromagnétiques critiques
KOUSRI Mohamed Raouf Université des Sciences et Technologies de Lille	1 mai 2013 7 juillet 2016	Développement et évaluation d'un outil d'analyse dimensionné pour les problématiques de compatibilité électromagnétique propres au milieu ferroviaire
ROMERO Grecia Université des Sciences et Technologies de Lille	1 janvier 2014 13 décembre 2017	Identification des mécanismes d'impact des interférences électromagnétiques sur des communications Wi-Fi

Table 2 : Taux d'encadrement

Nom du doctorant	Directeur de thèse	Taux d'encadrement personnel	Nature du financement
PICARD Aubry	Bernard Démoulin	10%	ANRT CIFRE

BEN SLIMEN Nedim	Sylvie Baranowski	80%	Allocation de bourse régionale
DUDOYER Stephen	Marc Heddebaut	50%	Allocation de bourse INRETS
MILI Souhir	Marc Heddebaut	50%	Financée sur projet Européen
KOUSRI Mohamed Raouf	Sylvie Baranowski Marc Heddebaut	60%	Allocation de bourse IRT Railénium
ROMERO Grecia	Éric Simon	50 %	Allocation de son pays Vénézuéla
STIENNE Olivier	Laurent Clavier Éric Simon	50 %	Financé par l'ICAM (il est enseignant ICAM et est libéré 50 % de son temps pour effectuer sa thèse en 6 ans.)

- **Encadrements de stages**

Julien Vilvandr , Christophe Rauwel, IUP GMI 3 me année, Automatisation d'un banc de mesures utilisant une cellule TEM Tridimensionnelle, encadrés conjointement avec Jean Rioult, mars à septembre 2002.

David Delcourt, IUP G.E.I.I 3 me année, Optimisation de la méthodologie de mesures employée en cellule TEM tridimensionnelle pour des tests de compatibilité électromagnétique, encadré conjointement avec Jean Rioult, mars à août 2003.

Joel Bonniez, Master 2 « Mesures et Contrôles », Evaluation de nouvelles techniques de compatibilité électromagnétique pour la Localisation de sources, encadré conjointement avec Jean Rioult, mars à juin 2004.

David Delcourt, Master 2 « G.E.I.I », Etude des problèmes de CEM posés par la cohabitation de la radio et d'autres équipements utilisés par la Direction Départementale de l'Equipement dans le cadre de ses activités, mars à juillet 2004.

Hamid Ouaddi, Master 2 « Microélectronique, Radiofréquences et Hyperfréquences », étude et caractérisation d'une chambre réverbérante à brassage de modes, avril à août 2006.

Brice Prouti re, Stage ingénieur Polytech'Lille, Contribution à la caractérisation du bruit électromagnétique (EM) engendré par un arc électrique entre une ligne et un plan de masse, mars à juillet 2007.

Maurice Largen, Master 2 « Ingénierie Mathématique, mention calcul Scientifique et

Applications », Etude de la capacitance d'un équipement électromagnétique, avril à septembre 2007.

Stephen Dudoyer, Stage ingénieur Polytech'Lille, Mise en œuvre de tests d'immunité des communications GSM-R face aux perturbations électromagnétiques présentes dans l'environnement ferroviaire, mars à août 2008.

Ajaratou-Siga Pouye, Stage ingénieur Polytech'Lille, Etude de l'Immunité des communications GSM-R face à des scénarios de bruits EM représentatifs de ceux observés à bord des trains, mars à août 2009.

Antoine Buonomo, Master 2 « Énergie Électrique et Développement Durable », Etude des perturbations électromagnétiques rayonnées d'un convertisseur DC/DC, mars à juin 2010.

Mohammed Ayad, Master 2 « Électronique, Instrumentation et Télécommunication », Contribution à la détection et à la caractérisation de bruits électromagnétiques transitoires, avril à octobre 2010.

Charbel Amoussou, Master 2 « système de communication radiofréquence », Etude d'une chaîne de caractérisation RF pour la conception et l'installation optimales de réseaux embarqués en milieu ferroviaire, mars à septembre 2011.

Nabil Ech Charraq, Licence informatique, Développement d'interfaces graphiques pour la classification d'environnements électromagnétiques, mai à août 2012.

Ahmed Bel Hadj Mabrouk, Master 2 « système de communication radiofréquence », Etude des possibilités d'utilisation d'impulsions EM pour les tests de compatibilité électromagnétique(CEM) en chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM), avril à septembre 2013.

Sofiane Bouguerab, Licence Informatique et communication appliqué au transport terrestre, Création d'une routine de conversion de fichier de données pour la génération de bruit EM, avril 2015 à août 2015.

Vincent Crauet, Stage ingénieur ISEN, Réalisation d'une interface radio logicielle, mars à septembre 2015.

Baptiste Quignon, Licence Cyber défense, anti-intrusion des systèmes d'information, Tests d'intrusion sur une liaison Wi-Fi 802.11n et définition d'indicateurs permettant la détection d'attaque sur une liaison Wi-Fi IEEE 802.11n, mars à juillet 2017.

Corentin GESNOT, Licence Cyber défense, anti-intrusion des systèmes d'information, Mise en œuvre d'une attaque par « Fake Access Point » dans le but de développer des méthodes de détection, mars à juin 2018.

IV.4. Participation à des projets de recherche collaboratifs

Depuis le début de ma carrière, j'ai pris part à plusieurs projets collaboratifs. J'ai participé à deux projets ANR, 4 projets européens et d'autres projets régionaux ou soutenus par l'ADEME.

Projet européen RAILCOM, PCRD 6

Décembre 2005 - mai 2009

Au sein de ce projet, j'ai assuré la coordination d'un des trois « Work Packages » techniques du projet, portant sur la connaissance des interférences EM produites par le système ferroviaire dans son ensemble et dans la gamme des hautes fréquences susceptibles de perturber les systèmes de communications.

Projet ANR-Transport CEMRAIL

Septembre 2006 - mars 2011

Au sein de ce projet, j'étais en charge de la mise en place des procédés de mesures et de caractérisation des signaux et interférences conduits, produits par les sous-stations électriques afin d'évaluer les perturbations rayonnées résultantes de leur circulation sur les caténaires.

Projet ANR-VTT METAPHORT

Septembre 2009 - septembre 2012

Dans ce projet j'ai été chargé de la caractérisation des perturbations EM présentes en toiture des véhicules de 100 MHz à 4 GHz qui sont susceptibles d'être captées par les antennes des systèmes de communication. Il s'agissait de mettre en place des procédés de mesures et d'analyse compatibles avec la large gamme de fréquences étudiée, pour caractériser aussi bien des perturbations permanentes que transitoires.

Projet européen TREND, PCRD 7

Octobre 2011 - mai 2014

Ce projet portait sur les tests de compatibilité électromagnétique dans le domaine ferroviaire afin de protéger les systèmes de communication et signalisation. J'ai coordonné un groupe de travail sur la modélisation des sources d'interférences EM au sein de ce projet européen TREND.

Projet européen SECRET), PCRD 7

SECurity of Railways against Electromagnetic aTtacks

Août 2012 - novembre 2015

Coordinatrice scientifique du projet

Projet régionale SECOURT sur la Cyber-SEcurité dans les systèmes COmmUnicants pour les Transports de ELSAT2020 CPER, depuis janvier 2016.

Co-porteuse du projet avec Smail NIAR (UVHC-LamiH)

AMI ADEME EWay

Etude de faisabilité d'un corridor électrique pour véhicules lourds, depuis octobre 2016.

Je suis en charge d'étudier les différentes solutions technologiques pour identifier les

problématiques de CEM liées à chaque solution.

Projet européen X2Rail

Mise à disposition pour Railenium, participation au projet européen X2Rail dans le cadre du programme Shift2Rail. Je suis impliquée dans les travaux portant sur la cyber sécurité dans le ferroviaire et plus précisément sur la détection de différents modes d'attaque sur les liaisons Wi-Fi, depuis septembre 2016.

Table 3 : Liste des projets auxquels j'ai participé

Acronyme/type	Nom du projet	Partenaires
RAILCOM PCRD 6	Electromagnetic compatibility between rolling stock and rail-infrastructure encouraging European interoperability	ALSTOM TRANSPORT, ANSALDO BREDAS, BOMBARDIER TRANSPORTATION, VUZ, DB, TECHNISCHE UNIVERSITAT KAISERLAUTERN, INRETS, NITEL, SIEMENS, SNCF, UIC, UNIFE, SBB, CD, CENTRUM NAUKOWO - TECHNICZNE KOLEJNICTWA, RFF
CEMRAIL ANR-Transport	Modélisation de la signature EM du système ferroviaire	ALSTOM TRANSPORT, Centre d'essais ferroviaire, RFF, Université des Sciences et Technologies de Lille
METAPHORT ANR-VTT	Application of Metamaterials for trainborne antenna integration and reduction of EMI between on-board systems in the railway environment	IFSTTAR, Télécom Bretagne, ALSTOM TRANSPORT, I-Trans, IEF, UBO, EPSEMU, IETR, XLIM
TREND PCRD 7	Test of Rolling Stock Electromagnetic Compatibility for cross-Domain interoperability	CEIT, CAF, IFSTTAR, CEDEX, York-EMC, Trafikverket, Lulea University of Technologies
SECRET PCRD 7	Security of Railways against Electromagnetic attacks	IFSTTAR, ALSTOM, Politecnico de Torino, EHU, SNCF, Zanasi & partner, Trialog, Fraunhofer IAIS, Université de Liège, UIC
E-Way Appel à Manifestation d'intérêt 2015-2020 « transition écologique et valorisation économique »	Corridor électrique pour véhicules lourds	O.I.E, IFSTTAR, SPIE, SANEF, ACCENTURE, AFNOR, TERCARA
SECOURT CPER Région Hauts-	Cyber sécurité dans les systèmes communicants pour les	IFSTTAR, UVHC, LamiH, IEMN-DOAE, IEMN-TELICE, ULCO, IMT,

de-France, programme ELSAT 2020	transports	Cristal
X2Rail, projet H2020, programme Shift2Rail	Start-up activities for Advanced Signalling and Automation Systems	ALSTOM, THALES, SNCF, RAILENIUM (IMT, Université de Lille, IFSTTAR)

IV.5. Activités communautaires et animations scientifiques

Depuis juillet 2011 : Membre d'un groupe de travail de l'ECTRI : « Work group on Security and Risk Management ».

2012 et 2014 : Membre du comité d'évaluation programme thématique STIC « Ingénierie Numérique & Sécurité » de l'ANR.

De janvier 2012 à janvier 2016 : animatrice d'un Groupe d'Échanges et de Recherche IFSTTAR (GERI) sur « l'Innovation dans les Transports Guidés Urbains et Régionaux ».

Depuis 2013 : Présidente de la section française de la commission E de l'URSI (Union Radio Scientifique Internationale).

Depuis août 2017 : Vice-Présidente de la commission E internationale de l'URSI.

IV.6. Activités d'expertise

Ma première expertise, menée de 2004 à 2006, portait sur les problèmes de Compatibilité Électromagnétique entre les communications radio et les équipements électriques et électroniques employés à bord et à proximité des véhicules de la Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E). La D.D.E opérait son propre réseau qui utilisait pour les liens montant et descendant des fréquences proches de 40 MHz, alors que les autres réseaux privés opéraient généralement dans les fréquences juste en dessous de la bande FM. En conséquence, les spécifications CEM définies par les constructeurs automobiles n'étaient pas adaptées pour protéger les signaux reçus à 40 MHz à bord des véhicules. Nous avons donc dû éditer des spécifications CEM pour les véhicules de service et des équipements installés sur ces véhicules, à partir d'une étude préalable du réseau D.D.E.

Par mon implication dans la plate-forme intégratrice « innovations dans les transports guidés urbains et régionaux, j'ai eu l'occasion de participer à une expertise collective avec plusieurs collègues de l'INRETS. Celle-ci portait sur le système de transport guidé Translhor de Clermont-Ferrand et a eu lieu en 2006. J'étais plus particulièrement en charge de l'analyse des rapports de mesures de CEM effectuées le long de la ligne de transport.

A la suite du projet SECRET, Alstom a souhaité regrouper un ensemble de recommandations qui pouvaient être extraites des travaux du projet SECRET. Ainsi, fin 2015, nous avons mené

une expertise pour ALSTOM en 2015 pour éditer une liste de recommandations visant à protéger les liaisons de communications sans fils ferroviaires en cas d'interférences EM intentionnelles.

J'ai mené une expertise pour l'institut VEDECOM pour accompagner les travaux du projet européen FP7 Fabric. Ce projet a porté sur la conception et l'implémentation à Satory d'une piste de recharge par induction des véhicules automobiles lors de leurs déplacements. Le projet s'est principalement penché sur la conception, l'implémentation et l'évaluation des performances de recharge. Cependant, en parallèle, l'institut VEDECOM a souhaité caractériser les émissions EM produites par la piste lors du passage des véhicules. Nous avons donc proposé et mis en œuvre plusieurs approches pour caractériser les émissions EM rayonnées par la piste de chargement au cours du déplacement du véhicule avec une résolution temporelle adaptée à la vitesse de déplacement. Nous avons également évalué les niveaux d'exposition des personnes aux champs EM à bord des véhicules et le long de la piste.

Depuis début 2017, Jean Rioult et moi-même menons une expertise pour Eurotunnel qui porte sur le suivi des études de CEM menées par la société SIEMENS en prévision de l'installation d'un câble très haute tension dans le tunnel ferroviaire. Nous sommes également amenés à effectuer un certain nombre de mesures afin de vérifier les hypothèses ou évaluations émises. Notre contribution doit permettre d'aboutir à des études suffisamment complètes pour garantir que l'ensemble des installations et équipements ferroviaires ne seront pas perturbés par les émissions produites par la ligne très haute tension.

Enfin, je participe actuellement à une expertise collective avec plusieurs collègues pour la DGITM. Cette expertise vise à établir une cartographie des projets de recherche traitant la sûreté dans les transports terrestres de 2006 à 2016, d'étudier les résultats et retombées de ces projets afin de les exploiter pour rédiger la future doctrine « Sûreté des transports terrestres ».

V. Synthèse de mes activités scientifiques

V.1. La problématique CEM dans le domaine des transports et de leur sécurité

Face à la présence de systèmes électroniques intégrés dans les véhicules et contrôlés par de faibles niveaux d'énergie, les études de compatibilité électromagnétique sont incontournables pour garantir le bon fonctionnement des différents modules d'un véhicule, parfois associés à des fonctions qui mettent en jeu la sécurité des passagers. La croissance de l'électronique, des systèmes de télécommunication, et plus récemment des objets connectés entraîne une augmentation des sources de perturbation éventuelles. La baisse progressive des niveaux de puissance nécessaires au fonctionnement des systèmes électroniques tend à les rendre également plus vulnérables.

L'aéronautique constitue un secteur précurseur pour la CEM car il fut un des premiers à mettre en évidence les dysfonctionnements associés aux problèmes de compatibilité électromagnétique pouvant mettre en cause la sécurité des personnes. Les avions ont ainsi constitué les premiers systèmes complexes regroupant, dans un espace confiné, une multiplicité de systèmes électroniques pour des fonctions de communication, de navigation et de radar de surveillance. De plus, en aéronautique, les études de CEM prennent également en compte l'effet de la foudre, fréquente en vol, sur les dysfonctionnements des équipements électroniques à bord.

Le secteur ferroviaire rencontre des difficultés de plus en plus similaires à celles connues en aéronautique. En effet, les systèmes ferroviaires actuels constituent également des ensembles complexes regroupant des modules électroniques assumant les communications intra structure et extra structure pour des besoins de contrôle-commande, de maintenance... De plus, en ferroviaire les systèmes électroniques doivent cohabiter avec des modules électrotechniques qui constituent d'importantes sources de perturbations. Les courants perturbateurs peuvent modifier les informations transportées par les réseaux de communication entre les différentes fonctions de contrôle-commande de la structure, pouvant mettre en cause la sûreté de fonctionnement. Avec le déploiement de l'ERTMS (European Railway Traffic Management System) qui entraîne la disparition progressive des informations de signalisation en bordure de voies, ces informations et les ordres de déplacement doivent parvenir directement en cabine de train par le biais de systèmes de communication sans fils. La bonne transmission de ces informations et leur protection vis-à-vis des interférences en présence sont ainsi essentielles pour une circulation optimale sur le réseau.

Dans le secteur automobile, le développement des fonctions d'aide à la conduite fait également craindre les conséquences auxquelles pourraient conduire des problèmes de CEM. Sachant que certaines de ces fonctions sont directement liées à la sécurité des occupants (freinage ABS, freinage automatique avec détection de personnes, régulateur de vitesse...), la CEM prend aujourd'hui une part importante dans la conception des automobiles. D'autant plus que le réseau routier est particulièrement étendu et qu'il faut garantir le bon fonctionnement des fonctions électroniques quelle que soit la localisation du véhicule. En effet, certains dysfonctionnements (déclenchement ou inhibition de fonctions électroniques) peuvent apparaître uniquement à proximité de sources localisées (émetteurs, lignes haute tensions...). Ainsi, les modules électroniques embarqués sur véhicules doivent vérifier des niveaux d'immunité importants. Les avancées actuelles dans le domaine des véhicules

autonomes passent par l'intégration de capteurs qui fournissent des informations vitales pour la sécurité des personnes et la transmission de ces informations entre les modules des véhicules doit être protégée des interférences présentes.

Quel que soit le domaine d'application, la mise en œuvre d'une démarche de travail visant à appréhender la CEM d'un moyen de transport passe par certaines étapes incontournables. Dans la mesure où il est improbable d'inhiber totalement les émissions non intentionnelles des systèmes, il est en revanche indispensable de les contenir dans des gabarits. Il devient alors possible de se baser sur les contraintes électromagnétiques maximales que les systèmes sont sensés rencontrer et par conséquent de penser leur conception pour que leur immunité électromagnétique soit suffisante. Ainsi, les travaux de recherche sur les moyens et méthodologies d'essais électromagnétiques qui permettent de quantifier les émissions et l'immunité des dispositifs selon des méthodes bien bornées, constituent nécessairement une voie fondamentale de la recherche en CEM. Pour faire évoluer ces méthodes avec les contraintes EM réelles et nouvelles rencontrées par les équipements dans leur milieu d'utilisation courante, la caractérisation des environnements EM est incontournable. En revanche, les méthodes de caractérisation d'environnements EM doivent être pensées en fonction des données que l'on souhaite obtenir. Il peut notamment s'agir de caractérisation de bruits électromagnétiques dans le domaine des fréquences ou dans le domaine des temps avec des résolutions spatiales plus ou moins fines. Les méthodes déployées dépendent généralement des caractéristiques des équipements que l'on cherche ensuite à protéger. En effet, il faut penser la méthode de caractérisation en fonction des interférences susceptibles de se coupler au système à protéger. Il est donc également indispensable d'étudier le comportement EM des dispositifs intégrés pour avoir une idée a priori des perturbations qui pourront être les plus pénalisantes afin d'adapter les approches de caractérisation à ces perturbations.

Ainsi, tous mes travaux ont trait à plusieurs de ces différents aspects, à savoir les moyens d'essais électromagnétiques, les méthodes de caractérisation des environnements électromagnétique et la susceptibilité électromagnétique des systèmes.

Dans ce mémoire, j'ai organisé la synthèse de mes travaux autour de trois axes. Pour débiter, je présenterai mes travaux sur les moyens et méthodologies d'essais électromagnétiques qui ont fait l'objet de mes premiers travaux à l'INRETS. Ensuite, je décrirai mes travaux portant sur la caractérisation d'environnements électromagnétiques transport et l'analyse du comportement électromagnétique des équipements et systèmes face à ces environnements. Enfin, la troisième partie portera sur les travaux menés concernant les interférences électromagnétiques intentionnelles et leur impact sur les systèmes de communication.

V.2. Mes recherches sur les moyens et méthodologies d'essais

Les méthodologies de mesures employées pour caractériser les équipements électriques et électroniques en immunité et en rayonnement et vérifier qu'ils respectent les normes sont spécifiées dans les directives européennes. La connaissance des niveaux de rayonnement et d'immunité des systèmes est obtenue au cours de tests effectués en moyens d'essais électromagnétiques. Ces dispositifs sont des cavités métalliques permettant de confiner le champ électromagnétique dans un volume fini. Ils permettent ainsi de mener des tests

d'émissions sans que le résultat ne soit perturbé par la pollution EM environnante. Ils permettent également de mener des tests d'immunité sans risquer de perturber le fonctionnement d'équipements ou d'installations situés dans le voisinage du site d'essai. Différents moyens d'essais existent. Tous possèdent des limitations qui peuvent porter sur la gamme de fréquences d'utilisation ou sur les principaux couplages susceptibles d'être mis en œuvre. Ainsi, pour caractériser un équipement sur une large gamme de fréquences, il est souvent nécessaire de disposer de plusieurs moyens d'essais. De plus, pour tester les équipements sous différents angles d'incidence du champ électromagnétique, ceux-ci doivent être successivement positionnés selon plusieurs orientations au sein de certains moyens d'essais, ce qui engendre des temps de tests conséquents. Certains travaux de recherches visent donc à enrichir les possibilités offertes par ces moyens, repousser leurs limites ou à développer de nouveaux moyens d'essais. C'est dans cet esprit qu'à mon arrivée à l'INRETS, j'ai principalement travaillé sur deux moyens d'essais à savoir, les cellules Transverse ElectroMagnétique Tridimensionnelles (TEM 3D) et les chambres réverbérantes à brassage de modes (CRBM).

V.2.1. Les cellules TEM 3D

La cellule TEM tridimensionnelle (TEM 3D) qui a été brevetée par l'INRETS en 2000 (WO0188554 (A1) - ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTING DEVICE), a également fait l'objet de ma thèse soutenue en 2003. J'ai donc pu découvrir les diverses opportunités que présente ce nouveau moyen d'essais pour les tests de CEM et à mon arrivée à l'INRETS, j'ai commencé par poursuivre les travaux engagés au cours de ma thèse. L'originalité de ce moyen d'essais EM réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de modifier l'orientation de l'équipement au sein de la cellule, contrairement aux cellules TEM et GTEM [1]. Ce qui engendre un gain de temps considérable. En effet, celle-ci est conçue pour que l'on puisse y produire un champ électromagnétique suivant 3 polarisations orthogonales entre elles. En retour la cellule permet également de mesurer les émissions d'un équipement en fonctionnement suivant ces trois polarisations de façon corrélée. Pour obtenir ce type d'information dans des moyens d'essais plus conventionnels tels que les chambres anéchoïques et les cellules TEM, la seule solution consiste à effectuer trois tests successifs en modifiant l'orientation de l'équipement sous test (EST). Ces méthodes ne permettent toutefois pas de corrélérer les phases des mesures effectuées successivement sous les trois incidences.

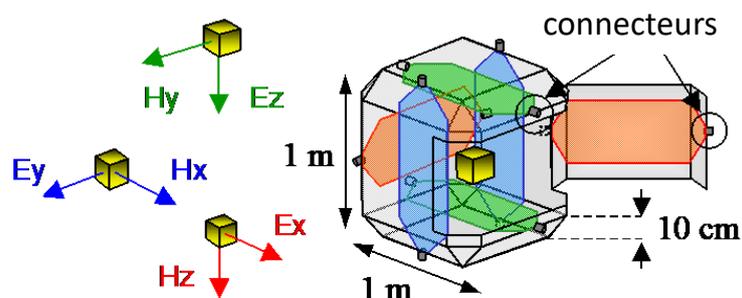


Figure 1 : Schéma d'une cellule TEM-3D à 6 septa

Au cours de mes quatre premières années d'activité en tant que chargée de recherche, mes

travaux sur les cellules TEM tridimensionnelles ont principalement porté sur leur utilisation pour les tests d'immunité des équipements électroniques et électriques. Actuellement, les méthodes classiquement appliquées pour évaluer et quantifier l'immunité d'un système, consistent à le soumettre à une perturbation électromagnétique connue en fréquence et en amplitude. Toutefois, la sensibilité de l'équipement à cette perturbation peut s'avérer variable en fonction de l'incidence de la perturbation émise par rapport à l'orientation de l'équipement sous test (EST). Ainsi, la répétabilité des essais est souvent mise en cause en raison de l'orientation arbitraire et plus ou moins pertinente donnée à l'équipement testé.

Dans ce contexte, la structure particulière de la cellule TEM tridimensionnelle a été étudiée afin de produire un environnement d'essai caractérisé par des perturbations électromagnétiques d'incidence variable dans le temps, mais dont l'amplitude et la fréquence restent maîtrisées et stables [1]. L'objectif est de s'assurer que tous les points de vulnérabilité de l'équipement sont soumis aux scénarios les plus critiques. A travers ces travaux, nous avons proposé une approche originale de méthode de test d'immunité aux perturbations basses fréquences. Les perturbations appliquées sont émises simultanément par les différents septa et l'EST est ainsi soumis à un champ électromagnétique résultant de la superposition des différentes émissions.

Cependant, pour assurer un champ d'amplitude constante mais de phase variable, il faut maîtriser les déphasages entre les sources.

Une première approche envisagée était d'alimenter les septa opposés dans la cellule par le même générateur, donc à fréquence identique mais en passant par un déphaseur de 180°. Ainsi, les septa opposés se trouvent alimentés en parfaite opposition de phase permettant d'obtenir un champ résultant dont l'amplitude est la somme des amplitudes des champs émis par les deux septa.

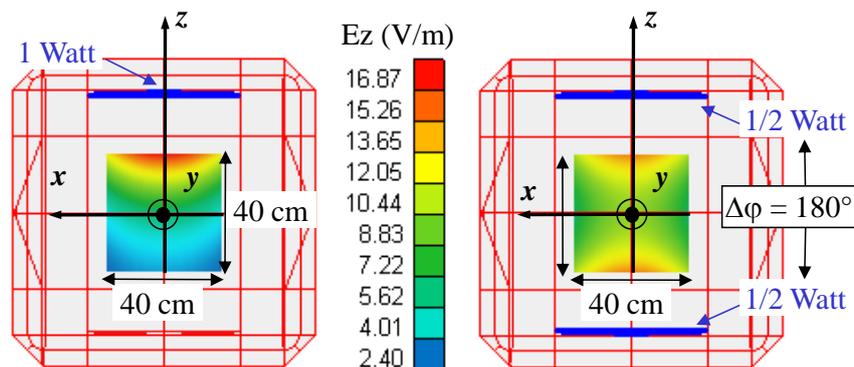


Figure 2 : Amplitude du champ E obtenu par simulation avec le logiciel WIPL-D à une fréquence de 75 MHz

Ce mode d'alimentation a pour effet une meilleure uniformité de l'amplitude du champ E dans la zone centrale de la cellule. Puis, pour obtenir un champ de phase variable dans un plan, donc « tournant », il suffit d'alimenter les autres couples de septa opposés mais avec un déphasage de 120° entre eux, telles que le montrent les expressions V-2-1 à V-2-5.

$$|E_x(t)| = 2A \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

V-2-1

$$|E_y(t)| = 2A. \cos (\omega. t + 2\pi/3) \quad \text{V-2-2}$$

$$|E_z(t)| = 2A. \cos (\omega. t + 4\pi/3) \quad \text{V-2-3}$$

Soit un champ électrique total résultant :

$$|E(t)| = \sqrt{E_x(t)^2 + E_y(t)^2 + E_z(t)^2} \quad \text{V-2-4}$$

$$|E(t)| = 2A. \sqrt{\frac{3}{2}} = \text{constant} \quad \text{V-2-5}$$

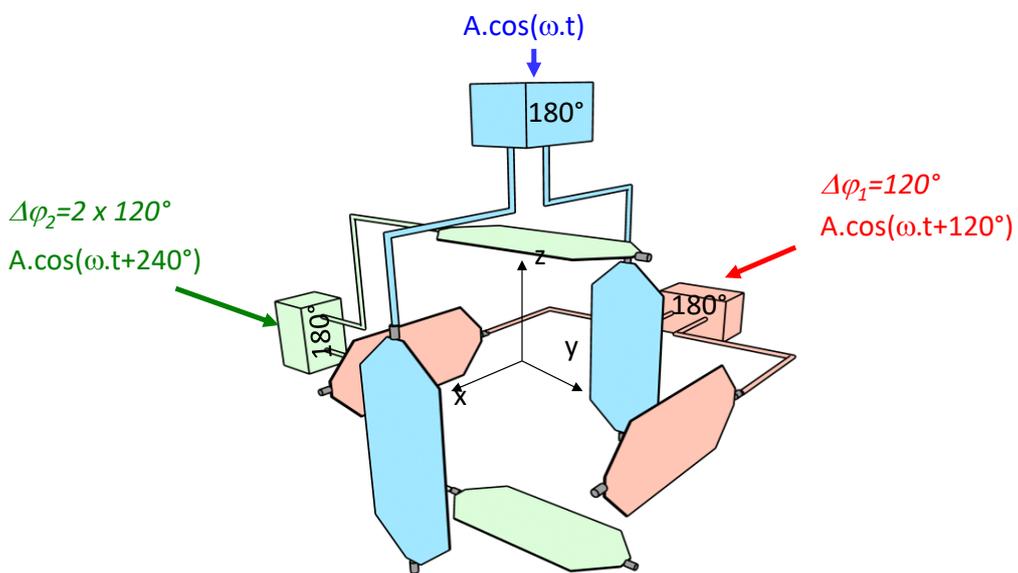


Figure 3 : Principe d'alimentation pour obtenir un champ d'amplitude constante et de phase variable

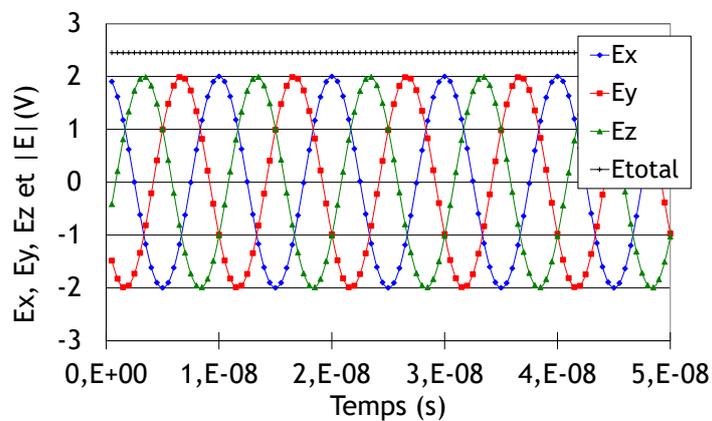


Figure 4 : Évolution des valeurs des composantes Ex, Ey et Ez au cours du temps

Cependant, si l'amplitude obtenue est parfaitement stable, la variation de phase n'est pas

satisfaisante car le champ E résultant évolue dans un plan unique, représenté Figure 5.

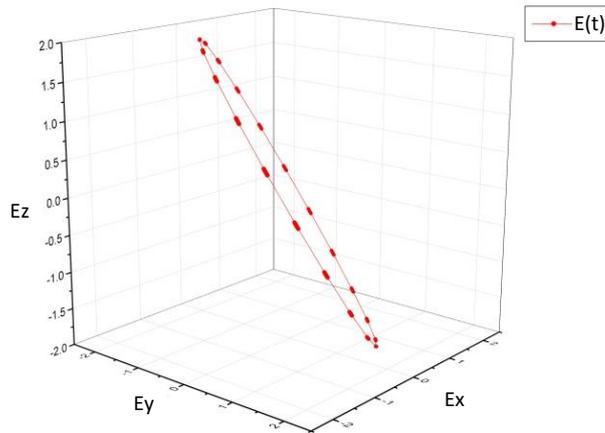


Figure 5 : Évolution du champ E total au cours du temps

Ainsi, une autre approche a été envisagée. Celle-ci consiste à faire varier la phase du champ total résultant en appliquant de légères différences entre les fréquences des signaux appliqués. Les septa opposés dans la cavité sont alimentés par des fréquences légèrement différentes, produisant une composante par axe d'amplitude variable au cours du temps.

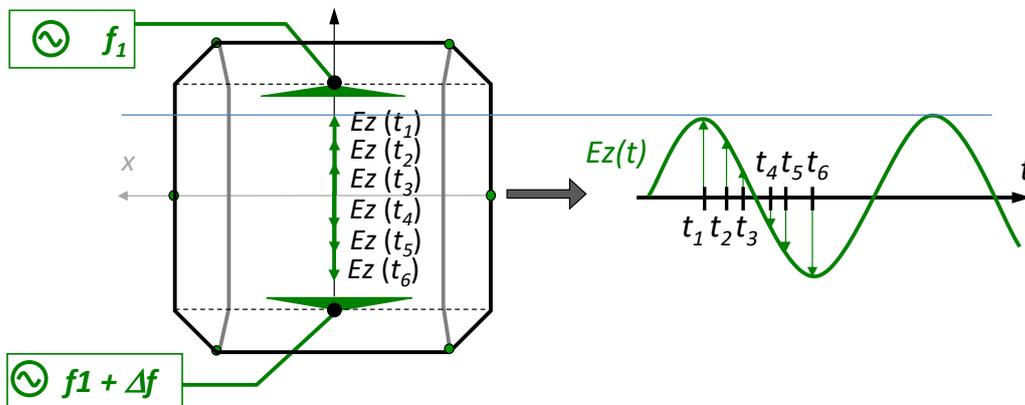


Figure 6 : Effet d'une différence entre les fréquences alimentant deux septa opposés

Dans les expérimentations menées, 3 septa sont alimentés par un unique générateur à la fréquence f_1 en utilisant un coupleur à 3 sorties. 2 autres septa sont alimentés par un second générateur à la fréquence f_2 et passant par un coupleur déphasant à 180° . Enfin, un troisième septum est alimenté par un dernier générateur à la fréquence f_3 . Ainsi, 3 fréquences légèrement différentes sont appliquées.

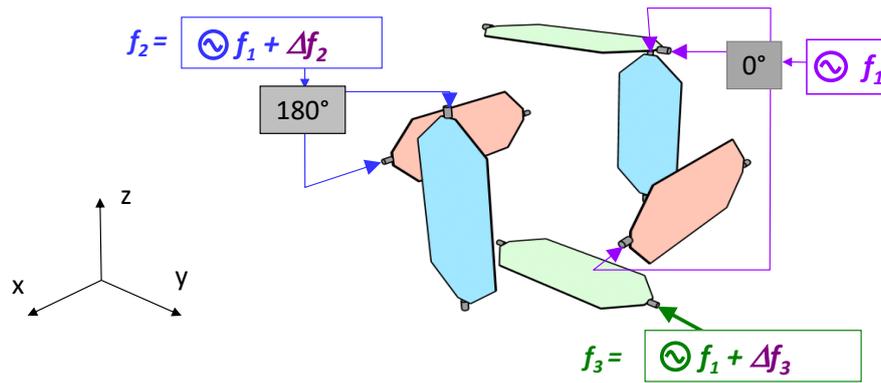


Figure 7 : Schéma d'alimentation des 6 septa

Les mesures de champs effectuées à l'aide d'une sonde triaxiale sur 5 secondes sont reportées Figure 8 pour une fréquence f_1 de 10 MHz, f_2 de 10 MHz + 10 Hz et f_3 de 10 MHz + 70 Hz. En procédant à un étalonnage préalable de la puissance à injecter par axe, on obtient un champ total variant de 15 à 20 V/m dans cette configuration d'alimentation.

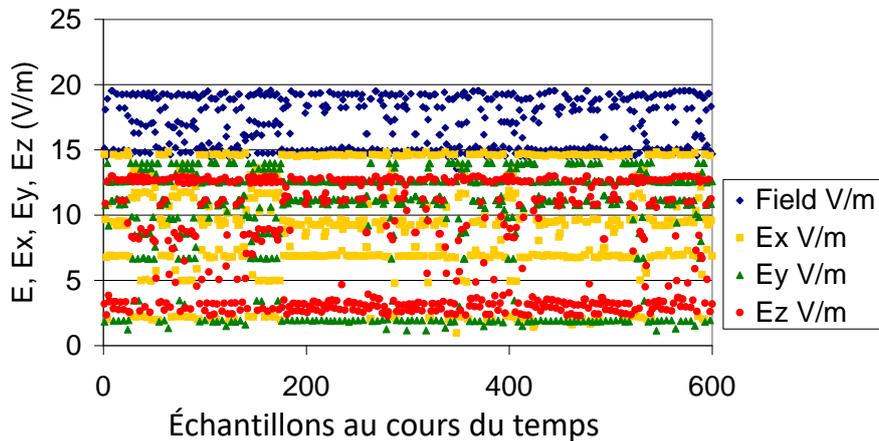


Figure 8 : Composantes Ex, Ey et Ez mesurées au cours du temps

L'histogramme des valeurs prises par les 3 composantes de champ Ex, Ey et Ez montre des variations d'ordre comparable.

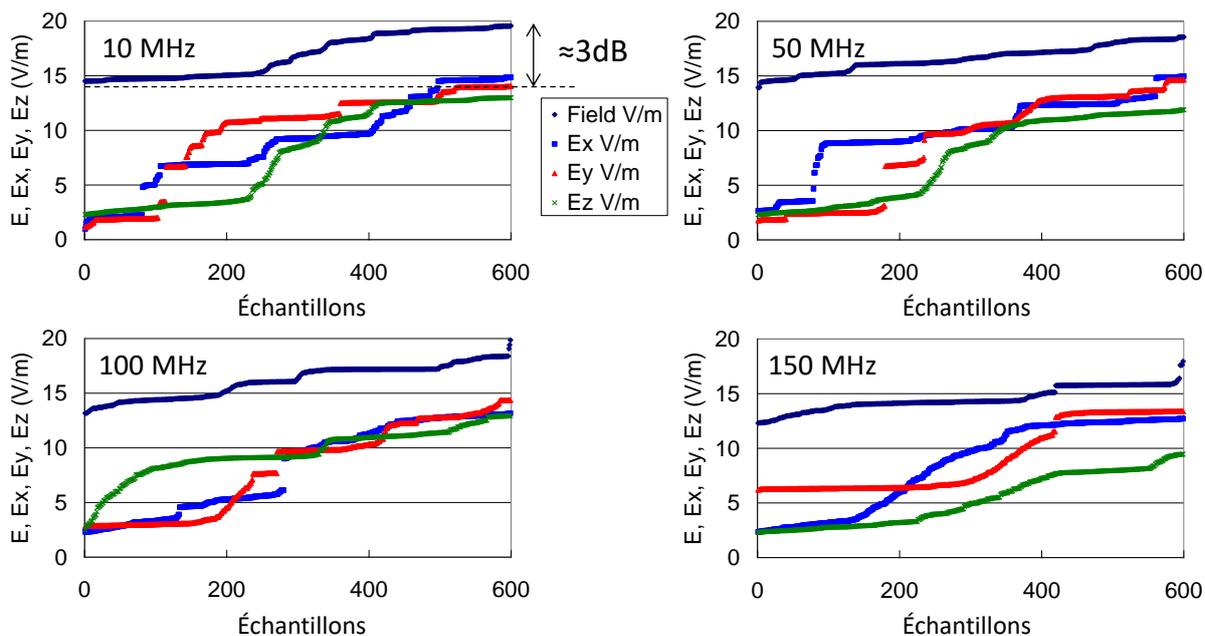


Figure 9 : Histogrammes de composantes Ex, Ey et Ez mesurées au cours du temps

Ainsi cette section illustre mes travaux sur les cellules TEM-3D. Sur ce moyen d'essais, j'ai également développé d'autres travaux en collaboration avec d'autres organismes rappelés ci-dessous.

Une première collaboration a été menée avec l'IRSEEM (Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués) afin de modéliser les phénomènes de couplage existant entre ce moyen d'essais et les équipements testés [3]. Ces recherches portaient sur les dimensions du volume d'essai exploitable au sein de la cellule TEM 3D et à étudier les couplages qui interviennent entre l'équipement sous test et les capteurs. Sur ce sujet, l'IRSEEM a financé la thèse d'Aubry Picard en contrat CIFRE et j'ai participé à l'encadrement de cette thèse à hauteur de 10%. Cette thèse a été soutenue le 6 juillet 2007 à l'Université de Rouen.

Une seconde collaboration s'est déroulée avec l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) sur le calcul de l'impédance caractéristique de la ligne de transmission que constitue la cellule TEM 3D. En effet, la formulation correcte de l'impédance caractéristique était requise pour optimiser les dimensions de la cellule. Ce travail consistait à revoir les expressions des paramètres linéiques (capacitance, impédance caractéristique) des cellules TEM qui dans leurs formulations approchées actuelles, impliquent des conditions sur les dimensions de la ligne que la cellule TEM 3D ne peut pas vérifier. Ces travaux ont permis d'exécuter un calcul exact, s'affranchissant des approximations qui imposaient des conditions non atteintes, pour obtenir les dimensions optimales de la cellule au regard de l'impédance caractéristique [4].

V.2.2. Les chambres réverbérantes à brassage de modes

Mes premiers travaux sur les chambres réverbérantes à brassage de modes (CRBM) ont porté sur l'utilisation de ce moyen d'essais aux fréquences inférieures à leur première fréquence de résonance.

V.2.2.1. S'affranchir de leurs limitations en basses fréquences

Les CRBM constituent également des moyens d'essais électromagnétiques permettant de contrôler les niveaux d'immunité et d'émission d'équipements électriques et électroniques. Ces chambres réverbérantes présentent de nombreux avantages notamment en termes de coût de réalisation et de volume d'essais. Cependant, elles ne peuvent pas être employées aux plus basses fréquences car les méthodes d'essais exploitent leurs modes de résonance. Elles comportent un dispositif appelé « brasseur de modes » qui est constitué de pales métalliques. Celui-ci pivote autour d'un axe pour prendre différents angles. Selon l'angle du brasseur, les fréquences aux quelles la chambre entre en résonance peuvent légèrement varier. A partir d'une certaine fréquence qui dépend des dimensions de la chambre, la densité de modes devient suffisante pour que l'usage du brasseur permette d'obtenir un recouvrement des modes.

Face à leur limitation en basses fréquences, j'ai mené des recherches sur les solutions qui pouvaient être envisagées pour utiliser ces chambres en dessous de leur première fréquence de résonance [5]. C'est ainsi que nous avons adjoint aux parois internes d'une chambre réverbérante des septa permettant d'utiliser le mode TEM qui existe en dessous de la première fréquence de résonance pour caractériser des équipements sous tests. En reprenant les approches analytiques développées pour la cellule TEM-3D puis en procédant à des modélisations à l'aide du logiciel WIPL-D, j'ai étudié les géométries et les dimensions des dispositifs à insérer pour exploiter le mode TEM [6]. La réalisation et l'intégration des dispositifs ont fait l'objet d'une collaboration avec l'UTAC. Les structures ont été installées au sein de la CRBM de l'UTAC dont un schéma est donné ci-dessous.

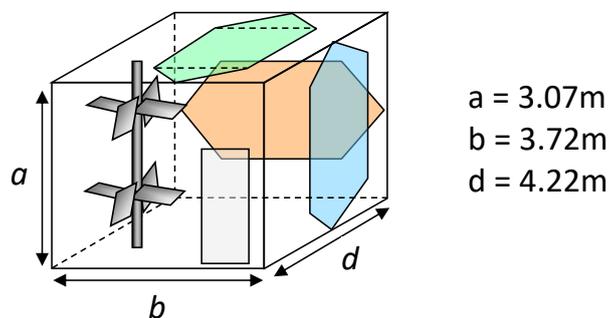


Figure 10 : Schéma et dimensions de la CRBM de l'UTAC

Plusieurs expérimentations ont ensuite été menées pour évaluer l'efficacité de ces dispositifs et vérifier que leurs présences ne dégradent pas le fonctionnement de la CRBM dans son

usage conventionnel en hautes fréquences [7][8]. Le coefficient de qualité et l'efficacité de brassage mesurés sans et avec septa chargés sur 50 Ω sont ainsi comparés dans les figures suivantes [9].

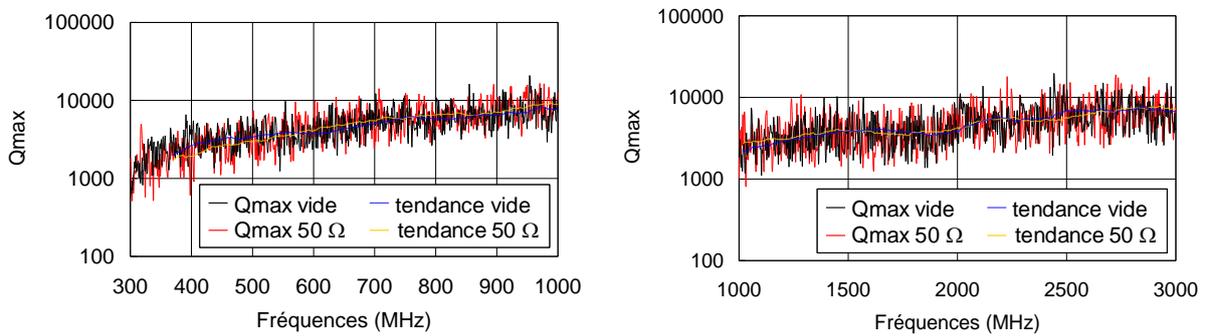


Figure 11 : Coefficient de qualité maximum mesuré sans et avec les septa chargés sur 50 Ω

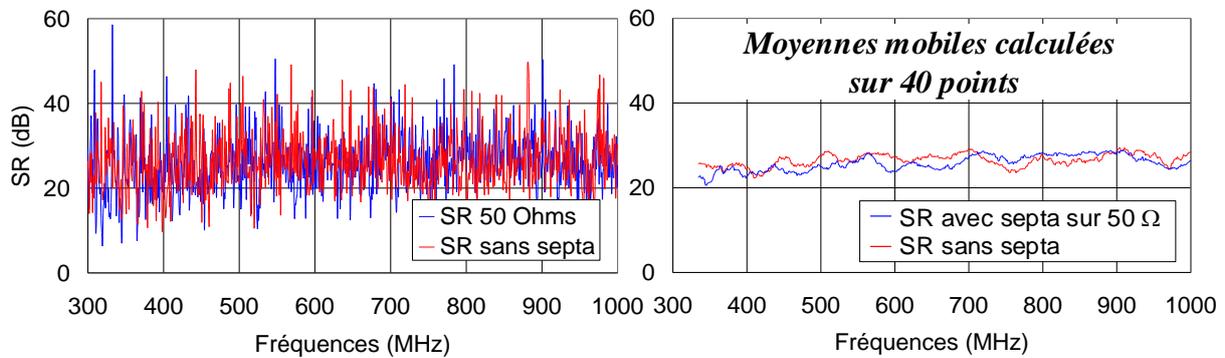


Figure 12: Coefficients d'efficacité de brassage et courbes de tendance avec et sans septa, entre 300 MHz et 1 GHz

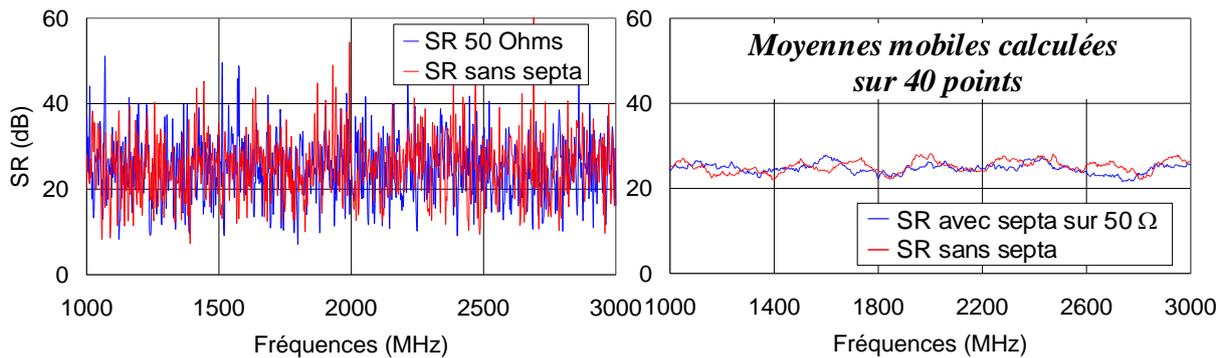


Figure 13 : Coefficients d'efficacité de brassage et courbes de tendance avec et sans septa, entre 1 GHz et 3 GHz

Ces résultats, de 300 MHz à 3 GHz, montrent l'impact négligeable de la présence des septa et des charges sur les coefficients de qualité et d'efficacité de brassage.

L'utilisation de ces structures pour effectuer de mesures de puissances totales rayonnées en basses fréquences a ensuite été testée. Pour un équipement sous test donné, les résultats ont

été comparés avec ceux obtenus en cellule TEM3D [10]. La puissance totale rayonnée exprimée par l'équation V-2-6, s'obtient en recueillant les puissances induites aux extrémités des septa. Un étalonnage préalable est nécessaire pour obtenir les composantes x, y et z du champ électrique, produites au centre du volume d'essai en alimentant successivement chaque septum par une puissance d'1 W.

$$P_t(f) = \frac{80 \pi^2}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{(P_{af}(f) + P_{bf}(f))}{E_{x0}^2(f)} + \frac{(P_{al}(f) + P_{bl}(f))}{E_{y0}^2(f)} + \frac{(P_{as}(f) + P_{bs}(f))}{E_{z0}^2(f)} \right] \quad \text{V-2-6}$$

où E_{x0} , E_{y0} et E_{z0} sont les composantes de champ normalisées pour 1 W, (P_{af} et P_{bf}), (P_{al} et P_{bl}) et (P_{as} et P_{bs}) sont respectivement les puissances mesurées aux extrémités des septa du fond, latéral et supérieur.

La cellule TEM-3D étant cubique, les trois composantes E_{x0} , E_{y0} et E_{z0} prennent des valeurs identiques. En revanche, la CRBM étant parallélépipédique, les trois composantes diffèrent. Les résultats présentés sur les courbes de la Figure 14 ont été utilisés pour recueillir la puissance totale rayonnée.

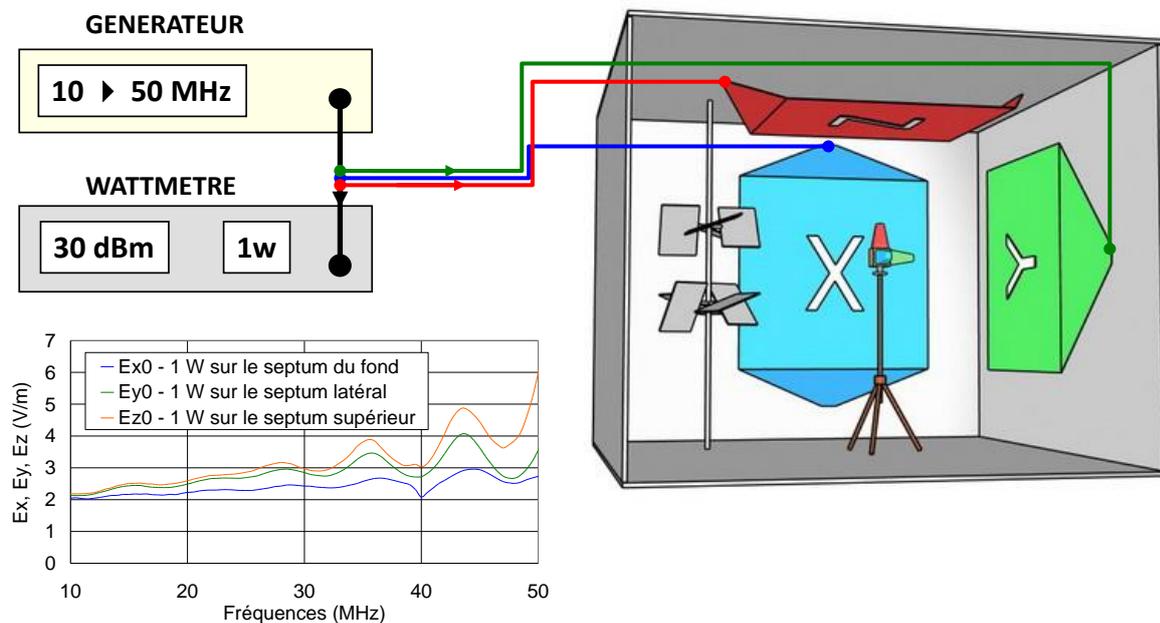


Figure 14 : Étalonnage préliminaire à la mesure de puissance rayonnée

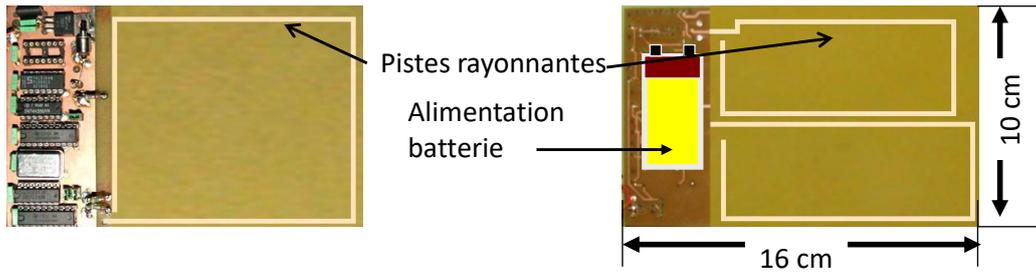


Figure 15 : Équipement sous test placé au centre du volume d'essai

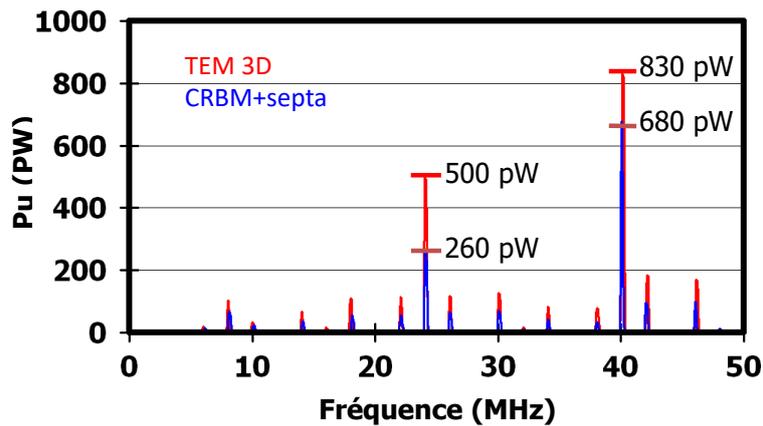


Figure 16 : Comparaison entre les puissances totales rayonnées obtenus en TEM 3D et en CRBM

Ces comparaisons montrent que les résultats obtenus en chambre réverbérante sont plutôt cohérents bien qu'inférieurs en niveau pour différentes raies des spectres de rayonnement obtenus en cellule TEM 3D. Ceci s'explique au moins par deux raisons. D'une part en cellule TEM 3D, les mesures sur les différents ports sont effectuées avec des câbles de deux mètres alors qu'en chambre réverbérante des câbles de 10 mètres sont employés en raison des dimensions importantes de la structure. Ceci engendre inévitablement des pertes supplémentaires croissantes avec la fréquence. D'autre part, des réflexions non négligeables peuvent aussi apparaître aux extrémités des septa en chambre réverbérante en raison des terminaisons imparfaites [11][12].

V.2.2.2. L'utilisation d'approches dans le domaine des temps en CRBM

Les CRBM sont désormais largement utilisées en CEM pour mener différents types d'essais. Elles permettent de procéder à des mesures d'émissions rayonnées, des tests d'immunité, des mesures d'efficacité de blindage, de la caractérisation d'antenne et de connecteurs... [18]. Dans le cas des mesures d'efficacité de blindage ou de qualification des antennes et des connecteurs, il est nécessaire d'alimenter le dispositif sous test au sein de la CRBM en incrémentant progressivement la fréquence afin d'extraire la signature du dispositif pour chacune des fréquences étudiées [19]. Sachant qu'en CRBM, à chaque fréquence testée, il faut appliquer une révolution de brasseur et collecter plusieurs dizaines de mesures au cours de

cette révolution, le temps d'essai peut être extrêmement long si l'on souhaite une résolution en fréquence fine et que la bande de fréquence à étudier est large.

En revanche, si l'on exploite un signal impulsif à large spectre, il devient possible de traiter une très large bande de fréquence avec une résolution en fréquence fine sans augmenter le temps d'essais. Dans la mesure où il n'y a plus de nécessité de balayer en fréquence, le temps d'essais peut être considérablement réduit. Cette possibilité a déjà été explorée à la fin des années 80 mais restait limitée par les équipements de mesures de l'époque [20]. Nous avons donc repris cette piste de recherche.

Ainsi, nous avons mené plusieurs travaux démontrant la faisabilité de ce principe en usant des avantages des générateurs de signaux arbitraires actuels afin de synthétiser des impulsions de formes d'ondes adaptées à nos mesures.

- Mesure du facteur d'étalonnage de la chambre par l'utilisation d'impulsions et méthode temporelle

Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre cette approche pour mesurer le facteur d'étalonnage de la chambre couramment désigné par CCF pour « Chamber Calibration Factor ». Ce paramètre correspond aux pertes d'insertion de la cavité.

Le procédé de mesure sur lequel nous avons travaillé consiste à injecter dans la chambre une impulsion large bande à l'aide d'un générateur de signaux arbitraires et à mesurer l'impulsion reçue par une seconde antenne positionnée dans la CRBM. L'impulsion doit être émise et mesurée pour chaque angle pris par le brasseur. Ainsi, nous avons synchronisé les instants d'arrêt du brasseur avec l'envoi et la mesure d'impulsions par un signal de déclenchement. Le principe de cette mesure est schématisé par la Figure 23.

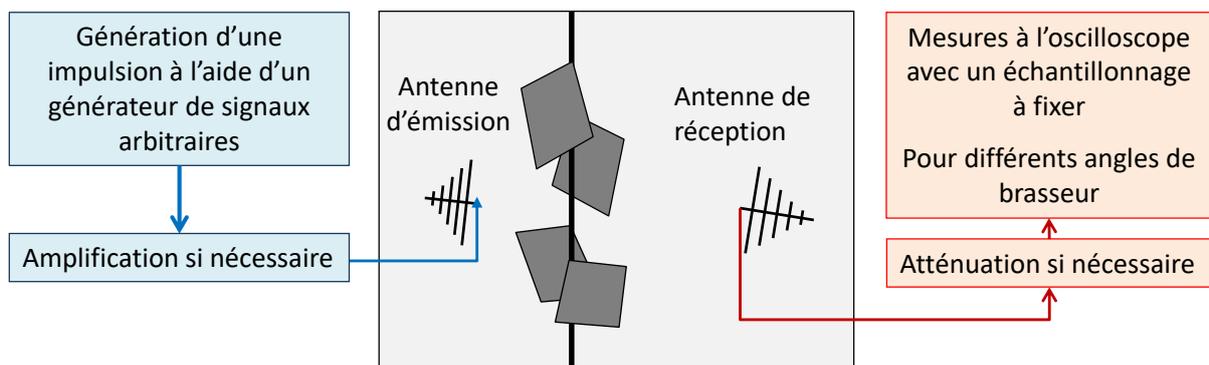


Figure 17 : Procédé de mesure du facteur d'étalonnage par l'utilisation d'impulsion large bande

Nous avons étudié l'efficacité de l'approche en fonction du choix de l'impulsion. Dans ce manuscrit, deux impulsions préliminaires sont explorées avant de définir une troisième impulsion mieux adaptée.

Une première impulsion large bande, classique en CEM, est définie par deux exponentielles.

Celle-ci occupe a priori, un spectre trop large par rapport aux performances de la CRBM, notamment en basses fréquences. Son expression est la suivante :

$$signal1(t) = \exp(-t / ft) - \exp(-t / rt) \quad V-2-7$$

Où ft désigne le temps de descente et vaut 2 ns et rt désigne le temps de montée et vaut 0.1 ns. La durée de l'impulsion à 50% de son amplitude maximale est 0.75 ns.

La seconde impulsion, exprimée par l'équation V-2-8, correspond à la première, mais filtrée par un filtre passe-bande 200 MHz - 1 GHz Butterworth d'ordre 4, pour s'affranchir des composantes basses-fréquences et délimiter la fréquence haute. Elle est ainsi mieux adaptée aux limitations de la CRBM.

$$signal2(t) = signal1(t).B_4(t) \quad V-2-8$$

Les deux formes d'ondes ont été définies sous Matlab puis enregistrées sur le générateur de signaux arbitraires. L'échantillonnage à l'émission et à la réception était de 10 giga échantillons par seconde.

Les impulsions injectées et leurs spectres respectifs obtenus par FFT sont présentés sur les figures 18 et 19.

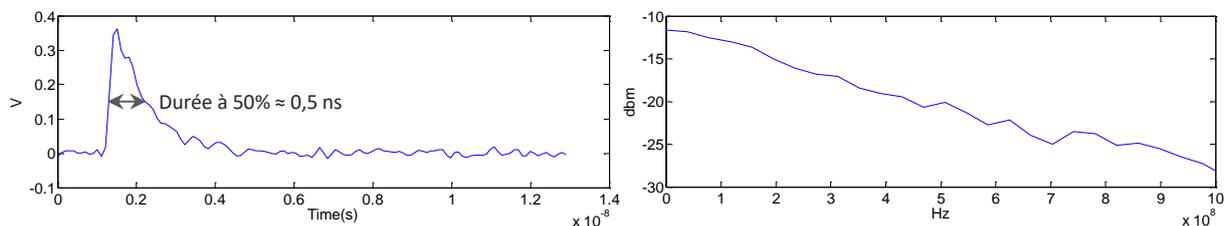


Figure 18 : Signal double exponentielle défini sur 128 points et FFT du signal calculée sur les 128 points

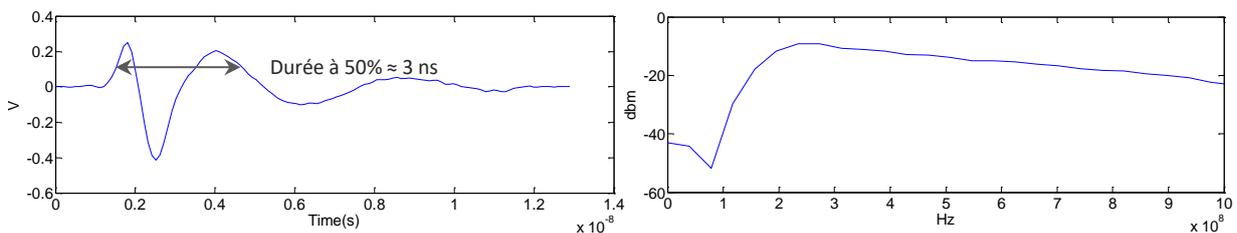


Figure 19 : Signal double exponentielle filtré défini sur 128 points et FFT du signal calculée sur les 128 points

Les impulsions mesurées par les antennes de réception pour les deux types d'impulsion apparaissent Figure 20.

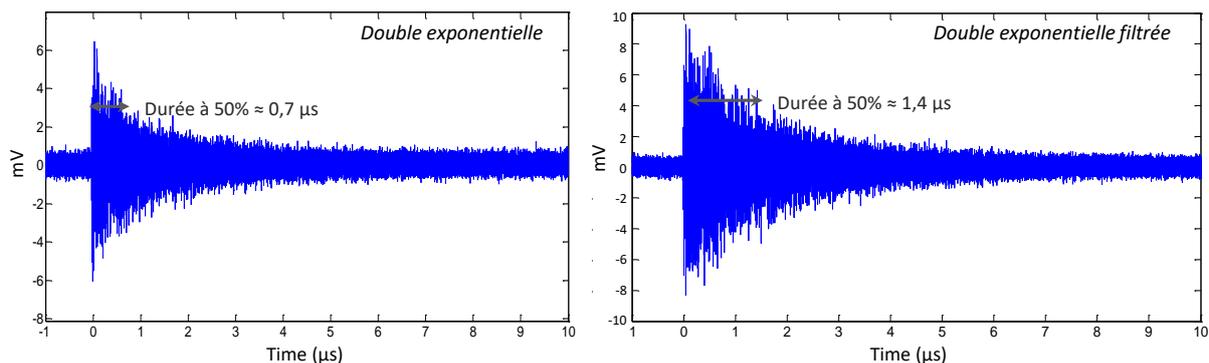


Figure 20 : Impulsions mesurées par l'antenne de réception pour les deux types d'impulsions émises

Les mesures sont représentées sur une durée plus longue que les impulsions injectées. En effet, en raison du temps d'amortissement de la CRBM, les durées des impulsions reçues sont bien supérieures aux durées des impulsions injectées. On atteint une durée de 1.4 μs à 50% de la valeur maximale pour l'impulsion filtrée alors que la durée de l'impulsion émise était d'environ 3 ns. La durée de l'impulsion reçue est dépendante de la constante de temps de la CRBM. Sur la Figure 21, on note que la constante de temps moyenne de la CRBM à 1 GHz est de 1.6 μs . Nous devons donc prendre en compte cette valeur de constante de temps dans le choix des fenêtres de temps à appliquer sur les impulsions reçues.

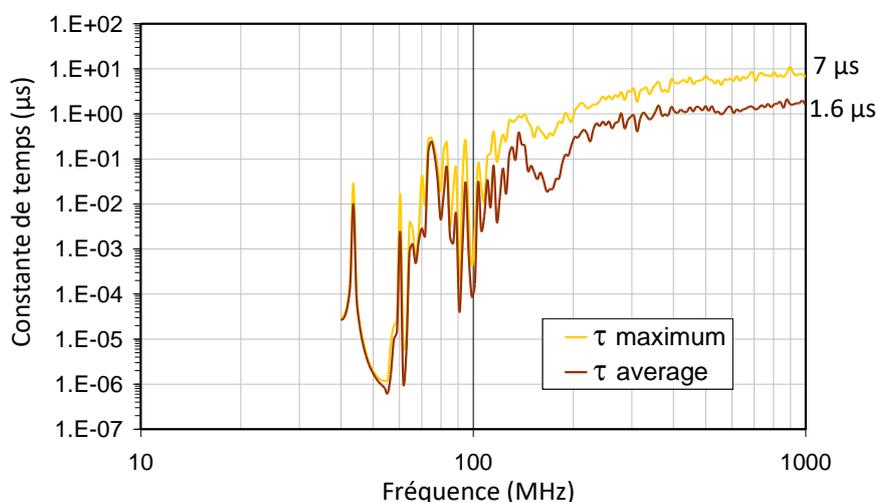


Figure 21 : Evolution de la constant de temps de la CRBM en fonction des fréquences

En effet, pour obtenir le facteur d'étalonnage de la CRBM, nous devons appliquer une FFT aux impulsions reçues pour chaque angle de brasseur ainsi qu'à l'impulsion émise, puis procéder à la différence des puissances émises et reçues sur chaque fréquence. Ainsi, dans l'ensemble des cas, la FFT est effectuée sur une fenêtre de 16384 points correspondant à une durée de 1.63 μs .

Les CCF moyen et maximal ont été obtenus à partir des expressions suivantes,

$$CCF_{Moy} = \left\langle \frac{P_{MoyRec}}{P_{entrée}} \right\rangle_{1tour} \quad V-2-9$$

$$CCF_{Max} = \left\langle \frac{P_{MaxRec}}{P_{entrée}} \right\rangle_{1tour} \quad V-2-10$$

Où $P_{entrée}$ est la puissance envoyée dans la CRBM, P_{MoyRec} et P_{MaxRec} sont les puissances moyenne et maximale reçues sur un tour de brasseur.

Les CCF moyen et maximal obtenus à partir de l'impulsion double exponentielle sont comparés Figure 22 à ceux obtenus en appliquant un balayage en fréquence.

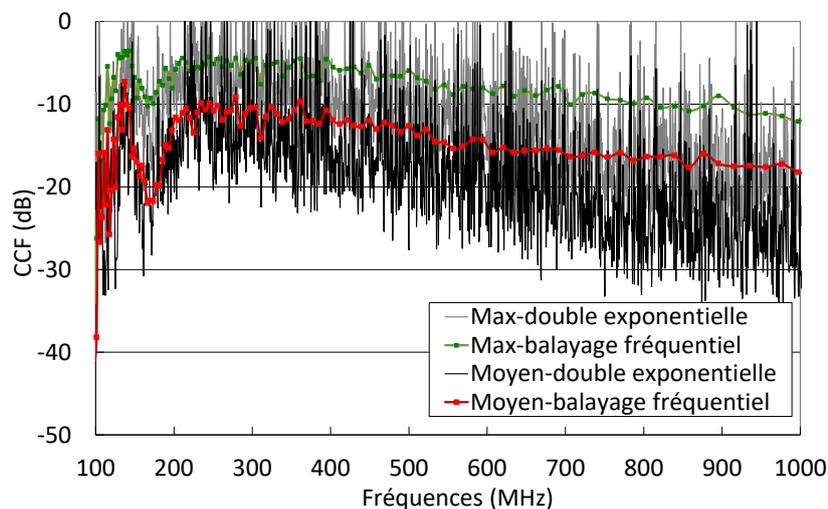


Figure 22 : Résultat de la mesure de facteur d'étalonnage pour une impulsion double exponentielle

Les courbes du CCF obtenues à partir de l'impulsion comportent logiquement plus de points, pour un temps de mesure inférieur. En effet, cette méthode permet de bénéficier d'une résolution en fréquence très élevée qui est définie par l'échantillonnage et la taille de la fenêtre d'analyse. On constate, cependant, que certaines valeurs excèdent 0 dB. Ceci s'explique par la taille de la fenêtre qui est employée pour appliquer la FFT. En effet, nous avons fixé la taille pour qu'elle soit au moins égale à la constante de temps de la chambre pour la fréquence de 1 GHz, appliquant ainsi une fenêtre de 1.63 μ s, ce qui constitue une durée très supérieure à celle de l'impulsion de 0.5 ns envoyée dans la chambre. Ainsi, le spectre de l'impulsion envoyée est nécessairement fortement sous-estimé sur certains points et lorsqu'on lui soustrait le spectre de l'impulsion reçue, des valeurs erronées peuvent être obtenues.

En revanche, les résultats de la Figure 23 obtenus avec l'impulsion filtrée s'avèrent plus satisfaisants.

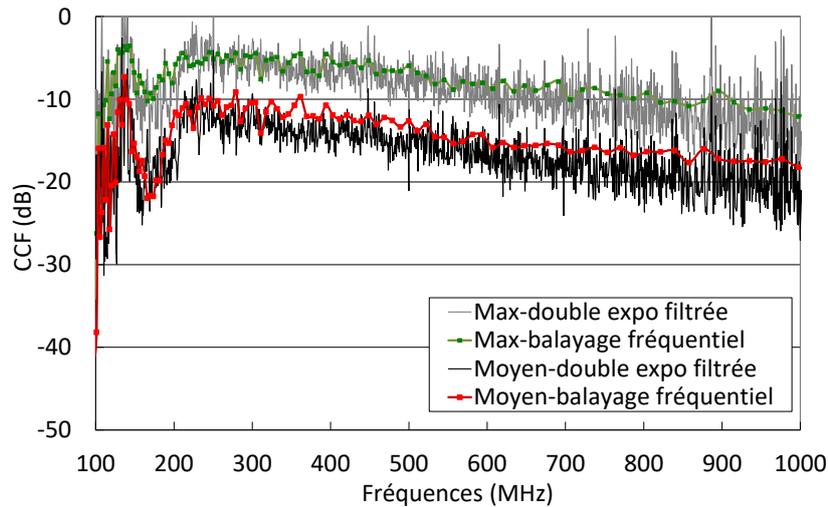


Figure 23 : Résultat de la mesure de facteur d'étalonnage pour une impulsion double exponentielle et filtrée par un filtre basse bande

En employant une impulsion plus adaptée à la bande étudiée puisque les composantes aux fréquences inférieures à 200 MHz et supérieures à 1 GHz sont filtrées, on obtient un résultat logiquement plus satisfaisant. D'une part, l'impulsion envoyée est bien plus longue puisqu'elle s'étend sur 3 ns, bien qu'elle soit encore courte devant la durée de 1.63 μ s. D'autre part, la puissance de l'impulsion est concentrée sur la bande de fréquence d'étude.

Ainsi, constatant l'importance des caractéristiques de l'impulsion, avant de procéder à des mesures d'efficacité de blindage, nous avons préalablement travaillé à la définition d'une impulsion jugée optimale.

L'inconvénient d'une impulsion de type double exponentielle est que son spectre n'est pas parfaitement plat. Ainsi, il faut nécessairement corriger le spectre de l'impulsion reçu en fonction de la puissance réellement injectée sur chacune des fréquences constitutives. Pour effectuer une correction rigoureuse, il faut donc appliquer un algorithme FFT sur les impulsions envoyée et reçue. Les algorithmes doivent s'appliquer sur des fenêtres de temps identiques afin d'obtenir une résolution en fréquence identique pour les deux impulsions et pouvoir effectuer une correction sur chaque fréquence.

On peut donc s'interroger sur la pertinence de cette méthode puisque les durées des impulsions envoyée et reçue sont très différentes et comme nous l'avons montré, cela dégrade les résultats.

La solution que nous avons adoptée consiste à employer un signal impulsif dont le spectre est parfaitement plat afin de s'affranchir d'une correction « point à point » puisque la puissance injectée devient stable sur toutes les fréquences du spectre.

L'impulsion est obtenue en sommant des signaux sinusoidaux auxquels s'appliquent un déphasage aléatoire à l'instant $t=0$.

Les paramètres suivants doivent être fixés :

f_{start} : fréquence du premier harmonique contenu dans le signal impulsif

f_{stop} : fréquence du dernier harmonique contenu dans le signal impulsif

f_s : fréquence d'échantillonnage du générateur de signaux arbitraires
 N_p : taille en nombre de points du signal temporel
 A : amplitude des harmoniques

La durée du signal est définie par le nombre de points du signal et la fréquence d'échantillonnage : $D = N_p / f_s$

N_p et f_s fixent le pas de fréquence, désigné par f_{step} , entre les harmoniques successives qui composent le signal.

Le signal synthétisé s'exprime ainsi :

$$S(t) = \sum_{n=N_{min}}^{N_{max}} (A \cdot \cos(2\pi n f_{step} t + \varphi_n)) \quad \text{V-2-11}$$

Où φ_n est un déphasage aléatoire, $f_{step} = F_s / N_p$, N_{min} est la valeur entière de (f_{start} / f_{step}) et N_{max} est la valeur entière de (f_{stop} / f_{step})

Le signal est synthétisé préalablement puis chargé dans le générateur de signaux arbitraires. Il est ensuite généré de manière continue ou répétée avec des intervalles que l'on peut fixer.

Les spectres des impulsions peuvent ensuite être mesurés à l'aide d'un analyseur de spectre, en utilisant la fonction « MaxHold ».

Cas 1 : $f_{start} = 100$ MHz, $f_{stop} = 1$ GHz, $N_p = 2048$ points, soit un intervalle d'environ 4.88 MHz entre les composantes spectrales successives.

La figure suivante présente le spectre mesuré avec deux bandes de résolution différentes de l'analyseur de spectre, à savoir de 1 MHz et de 120 kHz.

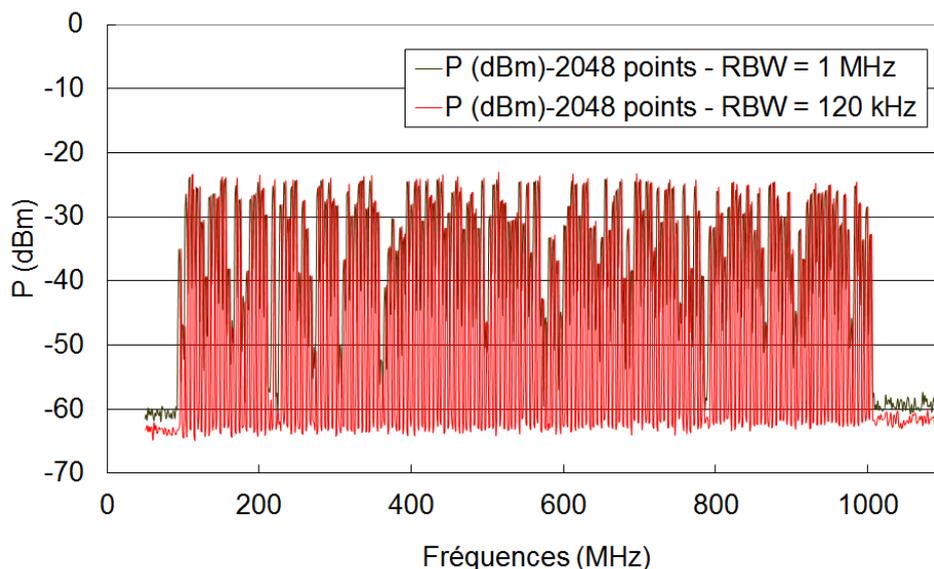


Figure 24 : Spectres de l'impulsion synthétisée, définie sur 2048 points, mesurés à l'aide d'un analyseur de spectre à travers deux bandes de résolution différentes de 1 MHz et 120 kHz

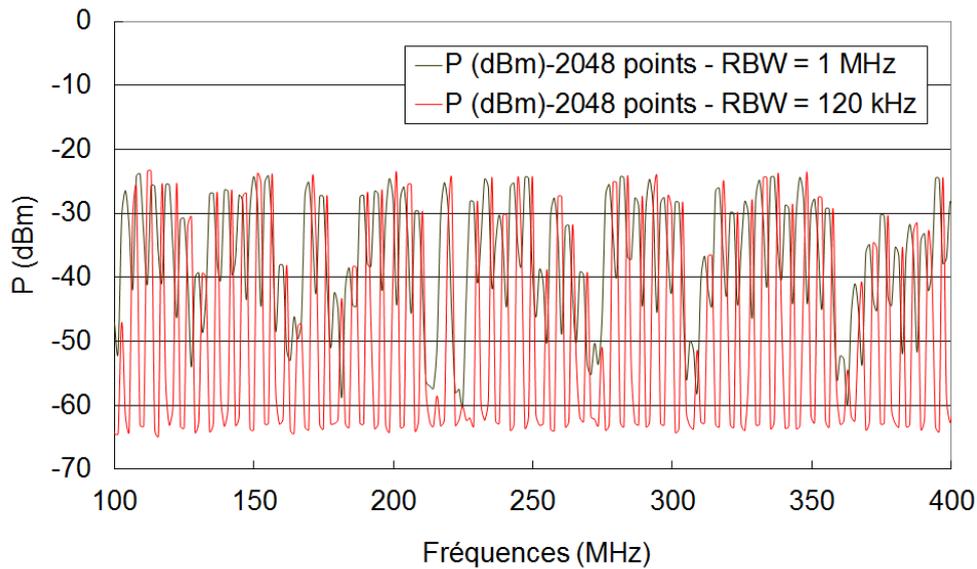


Figure 25 : Zoom de la Figure 50, sur la bande 100 MHz - 400 MHz

On note que toute la bande n'est pas parfaitement couverte lorsque l'impulsion est définie sur 2048 points. On constate également l'effet de la bande de résolution de l'analyseur de spectre. Dans le cas de 120 kHz, on distingue la séparation des composantes spectrales.

Cas 2 : $f_{start} = 100$ MHz, $f_{stop} = 1$ GHz, $N_p = 65536$ points, soit un intervalle d'environ 152 kHz entre les composantes spectrales successives.

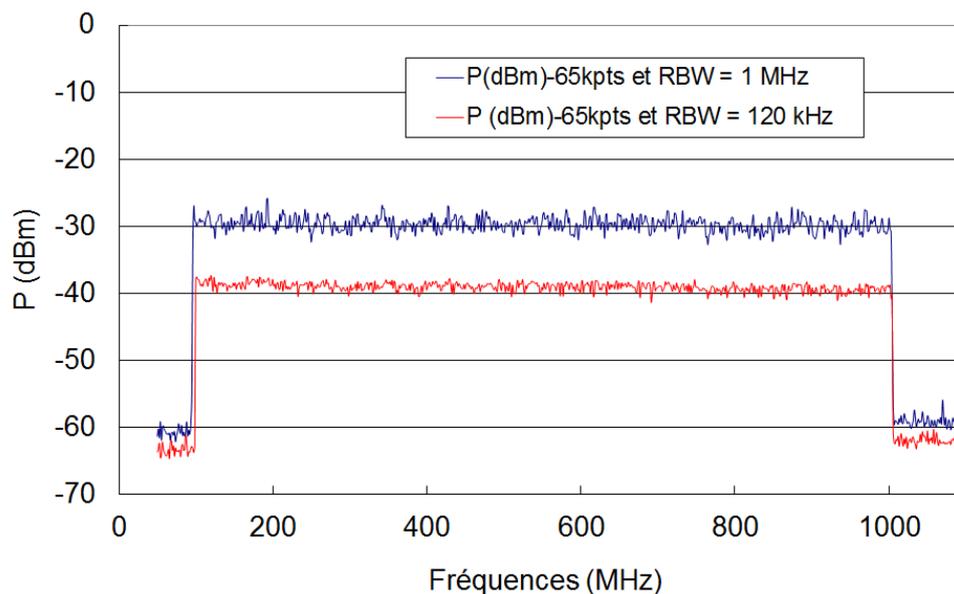


Figure 26 : Spectres de l'impulsion synthétisée-définie sur 65000 points- mesurés à l'aide d'un analyseur de spectre à travers deux bandes de résolution différentes de 1 MHz et 120 kHz

On constate qu'en augmentant le nombre de points qui définissent l'impulsion synthétisée, on obtient une couverture parfaitement stable sur toute la bande de fréquence pour les deux résolutions appliquées. En revanche, on observe nécessairement que la puissance mesurée

dépend de la bande de résolution de l'analyseur de spectre dès lors que le pas entre les composantes spectrales diminue et que ce pas est proche ou inférieur à la bande de résolution.

Ainsi, avec ce nouveau type d'impulsion, étant donné que la puissance injectée est stable, il n'est plus nécessaire de procéder à une comparaison point à point entre les spectres des impulsions reçues et ceux des impulsions envoyées. Ce qui évite d'adopter une fenêtre de calcul de durée démesurée par rapport à la durée de l'impulsion envoyée.

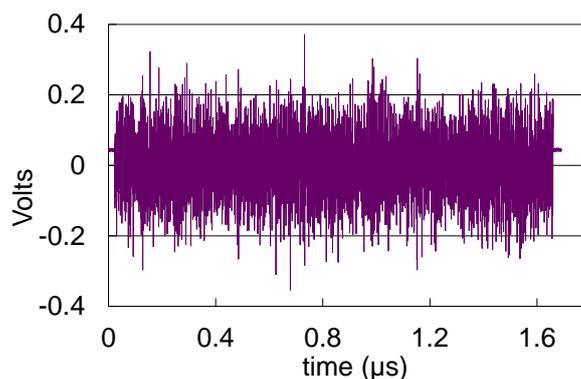


Figure 27 : Impulsion synthétisée et mesurée à l'oscilloscope

Nous avons utilisé ce type d'impulsion pour effectuer une mesure d'efficacité de blindage en CRBM.

Le dispositif pour lequel l'efficacité de blindage est mesurée est présenté Figure 28.



Figure 28 : Photographies du dispositif utilisé pour la mesure d'efficacité de blindage

Les étapes suivantes sont réalisées :

1 - On envoie l'impulsion amplifiée sur une antenne. L'amplification est nécessaire pour recueillir une tension suffisante à l'oscilloscope après l'atténuation engendrée par le blindage. Contrairement à l'impulsion double exponentielle, ce type d'impulsion peut être aisément amplifié sans saturer l'amplificateur.

2 - On mesure les impulsions reçues (sur 1 tour de brasseur) par le dispositif blindé. Ce qui fournit P_{EST} .

3 - On mesure les impulsions reçues (sur 1 tour de brasseur) par une antenne de référence. On obtient P_{Ref} .

En raison de la dynamique limitée de l'oscilloscope, il peut être nécessaire d'atténuer

l'impulsion reçue par l'antenne de référence. Pour éviter l'atténuation, on peut procéder à la mesure des impulsions de référence en injectant une impulsion $S_{ref}(t)$ dont la composition est identique à celle envoyée précédemment et mesurée sur le câble blindé mais en diminuant le facteur d'amplitude A d'un rapport $att=100$ par exemple, afin d'appliquer une atténuation constante d'au moins 40 dB qui peut ensuite être corrigée lors du calcul d'efficacité de blindage (EB).

$$S_{ref}(t) = \sum_{n=Nmin}^{Nmax} \left(\left(\frac{A}{att} \right) \cdot \cos(2\pi n f_{step} t + \varphi_n) \right) \quad V-2-12$$

$$EB = 10 \log (P_{Ref}/P_{EST}) \quad V-2-13$$

Les puissances que nous avons utilisées pour la mesure de l'efficacité de blindage, sont les valeurs maximales relevées sur un tour de brasseur.

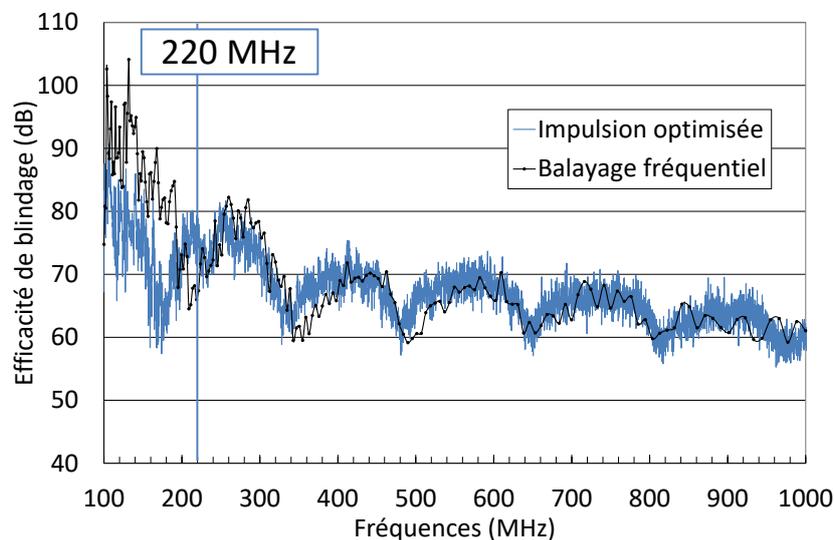


Figure 29 : Comparaison entre les courbes d'efficacité de blindage obtenues par les deux méthodes

La mesure équivalente utilisant un balayage en fréquence a été réalisée en activant le brasseur en rotation continue, pour 201 fréquences comprises entre 100 MHz et 1 GHz, évoluant suivant un pas logarithmique. Cette mesure a nécessité une durée d'environ 40 minutes.

La méthode reposant sur l'envoi d'une impulsion amplifiée (amplificateur de 30 W) a été réalisée en activant le brasseur en mode pas à pas et en marquant 72 angles. Le résultat comporte environ 6500 fréquences entre 100 MHz et 1 GHz et offre une résolution d'environ 150 kHz. Cette mesure a pu être effectuée en moins de 10 minutes. Cette méthode apporte donc un gain de temps significatif.

On constate une bonne correspondance entre les résultats des deux approches à partir de 220 MHz, qui correspond à la fréquence basse d'utilisation de la chambre. On note également que

la résolution offerte par la méthode proposée est bien supérieure à celle qui emploie un balayage en fréquence. En effet, le résultat est obtenu pour 6500 fréquences entre 100 MHz et 1 GHz contre 201 fréquences lorsqu'on applique un balayage en fréquence. Cette résolution très fine peut s'avérer très utile pour détecter certains défauts de blindage.

Ces travaux ont conduit à un montage de projet ANR avec les sociétés SIEPEL et FCI qui n'a malheureusement pas été retenu pour financement. C'est un sujet qui, je pense, reste très pertinent, notamment en raison des performances toujours plus élevées des générateurs de signaux arbitraires. Cependant, l'absence de financement a conduit à interrompre ces travaux qui ont fait l'objet de deux publications [13][14].

V.2.2.3. Autres travaux sur les CRBM

Lorsque l'INRETS a fait l'acquisition d'une nouvelle chambre réverbérante en décembre 2005 en copropriété avec l'équipe TELICE de l'IEMN, j'ai encadré conjointement avec Jean Rioult et Lamine Koné du laboratoire TELICE, les travaux portant sur l'étalonnage complet de cette nouvelle chambre. En effet, l'étalonnage des chambres réverbérantes comporte de nombreuses étapes, des mesures longues et des traitements des données complexes puisqu'il s'agit d'analyser statistiquement une grande quantité de valeurs.

A la suite de ce travail d'étalonnage, nous avons maintenu notre collaboration et nous nous sommes ensuite orientés vers l'utilisation de ce moyen d'essais pour établir des mesures d'émissions rayonnées. En effet, si l'utilisation des CRBM pour tester l'immunité d'équipements est relativement bien admise, leur usage pour le contrôle des émissions rayonnées par des équipements sous test est moins courant. Ainsi, j'ai étudié l'impact de la surface de la zone d'émission sur la « puissance totale rayonnée » mesurée au cours de l'essai [15]. Nous avons également entamé des travaux qui portaient sur la mesure de courant de surface sur les parois internes dans l'objectif de vérifier l'homogénéité statistique dans le volume d'essai [17].

V.2.3. Tests d'immunité des radio communications en modes conduits

Si les tests aux perturbations rayonnées s'avèrent indispensables pour garantir l'immunité d'un système face aux perturbations qu'il rencontrera, ces tests peuvent cependant être peu adaptés pour mener des études plus précises qui visent à identifier les facteurs les plus influents sur le bon fonctionnement d'un système. En effet, la variabilité des résultats ne permet pas toujours d'établir des tendances de comportement liées à certains facteurs. Ainsi, des tests en mode conduit, offrant des résultats plus répétables peuvent être bien adaptés à ce type de travaux.

J'ai donc travaillé sur la mise en place de test sur les communications numériques face à des interférences EM représentatives de celles rencontrées en milieu transport. Ce travail a débuté dans le cadre du projet européen (FP6) RAILCOM. Il s'agissait, pour nous, de développer un banc de mesures qui permette d'effectuer une étude paramétrique, en faisant varier les principales caractéristiques des interférences EM, afin d'identifier les facteurs influençant le plus la qualité de la communication.

Le projet RAILCOM traitait des problèmes de compatibilité électromagnétique rencontrés par les technologies de télécommunications employées dans le domaine ferroviaire pour transmettre la voix et les informations de signalisation.

Lorsque nous avons abordé ce thème, nous n'avions pas de connaissances a priori des interférences électromagnétiques présentes dans l'environnement ferroviaire aux endroits où se situent les antennes des systèmes de communication car il n'existe aucune méthode de caractérisation EM standardisée ou systématique à bord des véhicules. En effet, les seules méthodologies décrites par la normalisation européenne sont celles effectuées à 10 m du train dont le but est de vérifier que l'infrastructure ferroviaire ne perturbe pas les équipements situés à proximité des voies ferrées.

De plus, les mesures qui avaient déjà été effectuées à bord des trains dans certains projets tels que le projet EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network project*) [21], adoptaient des échantillonnages d'acquisition dans le temps, trop faibles pour étudier les interférences dans les gammes de fréquences des dispositifs de communication. Or, la connaissance des perturbations agissant sur les équipements à bord est nécessaire pour garantir leur bonne intégration.

Les travaux que nous avons menés sur la caractérisation des interférences in situ seront décrits dans la section V.3. Les modèles que nous décrivons et employons dans cette partie sont issus de ces travaux de caractérisation préalables.

V.2.3.1. Le système de communication GSM-R

Le système de communication auquel nous nous sommes intéressés est le système GSM-R (Global System for Mobile communications-Railways). Le GSM-R est un standard de communication sans fil dérivé du GSM [16] et développé spécifiquement pour les applications et les communications ferroviaires. Il est destiné à assurer la transmission de la voix et des informations de signalisation entre les trains et les centres de contrôle sur le réseau ferroviaire européen à grande vitesse. Il permet ainsi aux trains de communiquer avec les postes de régulation du trafic ferroviaire et aux agents de conduite, de circulation et de maintenance, de communiquer entre eux en mode conférence (appels de groupe).

Il est actuellement exploité et toujours en cours de déploiement en Europe pour satisfaire la volonté d'interopérabilité des dispositifs de communications ferroviaires au niveau européen.

En Europe, le GSM-R utilise les bandes de fréquences suivantes :

- 876 MHz – 880 MHz pour le lien montant (uplink)
- 921 MHz – 925 MHz pour le lien descendant (downlink)

Chaque bande comporte 20 canaux avec un espacement de fréquence entre chaque canal physique de 200 kHz. La modulation est de type GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Le réseau GSM-R se compose de tours relais appelées BTS (Base Transceiver Station) dédiées, et positionnées à proximité de la voie ferrée. La distance entre chaque BTS est de l'ordre de 5 km. Le GSM-R est également un système TDMA (Time Division Multiple Access), c'est à-dire de multiplexage temporel où la transmission des données est organisée pour chaque porteuse (ou canal physique) par trame TDMA périodique (de période 4.615 ms). Chaque trame TDMA

est découpée en 8 intervalles de temps (time slots) également appelés canaux logiques (d'une durée de 577 μ s chacun), composés de 148 bits d'information. La durée d'une trame TDMA est donc de 8 time slots soit 4.6152 ms. Chaque utilisateur utilise un slot par trame TDMA.

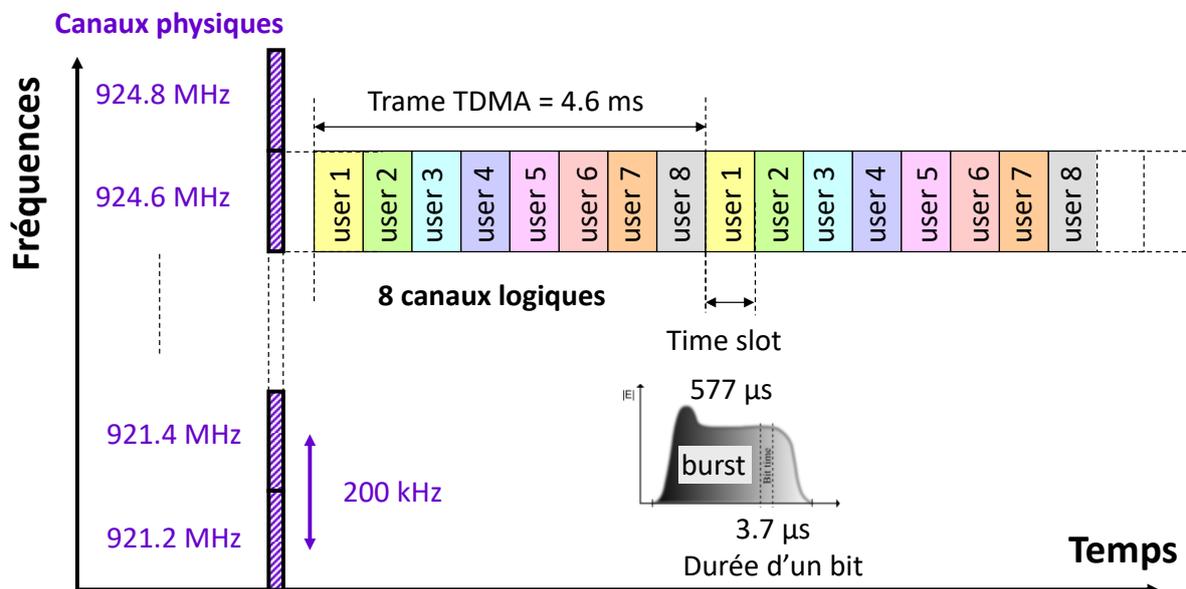


Figure 30 : Schématisation du mode de fonctionnement du système GSM-R

Deux paramètres existent pour contrôler la qualité de la liaison :

- Le RXLEVEL qui mesure le niveau de signal reçu sur 64 niveaux. Les niveaux ou indices, numérotés de 0 à 63, représentent les puissances s'échelonnant de -110 dBm à -48 dBm par pas de 1 dB. Ainsi la puissance reçue exprimée en dBm est égale à $(-110 + \text{RXLEVEL})$ dBm.
- Le RXQUAL, évalue quant à lui, la qualité du signal. Il est obtenu en quantifiant le taux d'erreurs binaires (BER : Bit Error Rate) sur 8 niveaux (soit sur 3 bits) suivant la correspondance définie dans le tableau qui figure ci-dessous.

Table 4 : Correspondance entre indices de RXQUAL et valeurs de BER

RXQUAL i Niveaux de qualité i	BER	Valeur représentative de BER
0	BER < 0.2 %	0.14 %
1	0.2 % < BER < 0.4 %	0.28 %
2	0.4 % < BER < 0.8 %	0.57 %
3	0.8 % < BER < 1.6 %	1.13 %
4	1.6 % < BER < 3.2 %	2.26 %
5	3.2 % < BER < 6.4 %	4.53 %

6	6.4 % < BER < 12.8 %	9.05 %
7	12.8 % < BER	18.10 %

La valeur représentative correspond à la moyenne géométrique des bornes de la plage et est calculée selon la formule V-3-14.

$$BER(i) = \sqrt{2} * 2^i * 0.1\% \quad \text{V-3-14}$$

Ainsi, plus l'indice de RXQUAL est bas, meilleure est la qualité de la communication. Le RxQual est obtenu en estimant le taux d'erreur binaire sur la séquence d'apprentissage contenue dans la trame. En pratique, l'exigence de qualité dans le domaine ferroviaire impose un RXQUAL inférieur ou égal à 3.

V.2.3.2. Test de susceptibilité des radio communications GSM-R

Pour étudier l'impact de ces perturbations sur le système de communication GSM-R, nous avons envisagé des tests d'immunité en mode rayonné et en mode conduit. Cependant, les tests d'immunité en mode rayonné ont été rapidement écartés car les perturbations les plus fréquentes observées sur les trains s'avèrent être des perturbations transitoires de large bande. Ainsi, en mode rayonné, leur étalonnage est complexe. Ce qui affecte la répétabilité des résultats.

Nous nous sommes donc orientés vers le mode conduit qui permet de s'affranchir des antennes et qui consiste à envoyer des perturbations sur un câble support de la communication entre l'émetteur et le récepteur [23].

Le banc de tests d'immunité est représenté Figure 31. Nous avons choisi d'utiliser un coupleur 4 voies dont nous avons au préalable mesuré les paramètres S ainsi que des circulateurs afin de protéger les générateurs des signaux émis par le mobile.

Le coupleur 4 voies permet d'interfacer le mobile, les générateurs de signaux et le simulateur de réseau. Le signal dit de « retour » émis par le mobile se répartit sur les 4 voies et par conséquent la puissance associée sera divisée par 4. Malgré la division de puissance, ce signal peut encore s'avérer néfaste pour les générateurs s'il leur parvient, d'où la nécessité de placer des circulateurs entre le coupleur et les générateurs.

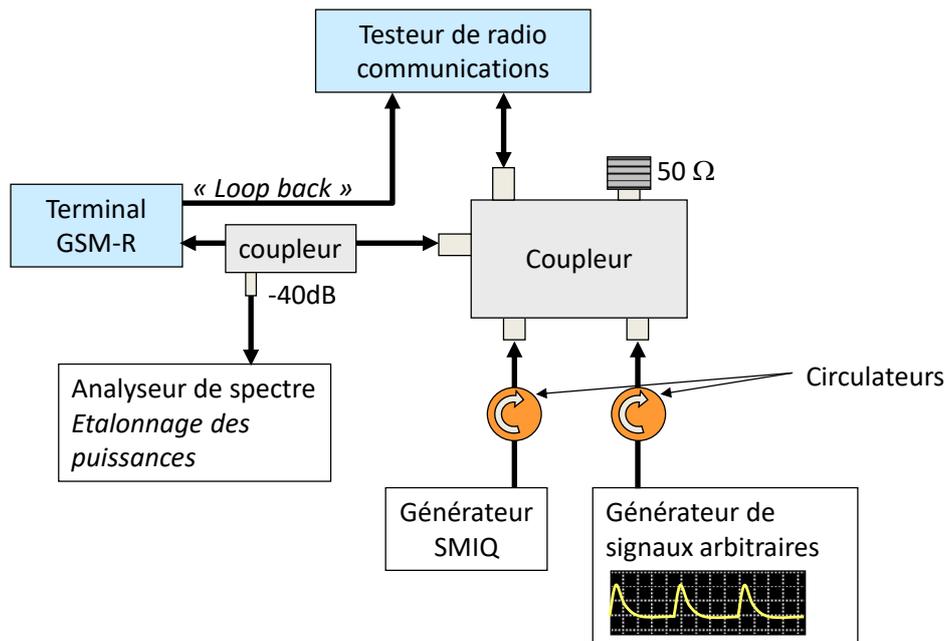


Figure 31 : Schéma du banc de tests d'immunité des communications GSM-R

Le testeur de radio communication (CMU 200 de R&S) émule une station de base [22]. Il émet un signal descendant vers le terminal GSM-R et reçoit le signal montant provenant du terminal. Le terminal GSM-R est configuré dans un mode de test appelé « Loop back », il renvoie ainsi sur une autre sortie directement raccordée au CMU200, une portion (en puissance) du signal qu'il reçoit vers le testeur de radio communication. Ce dernier peut ainsi comparer ce qui est reçu par le mobile à ce qu'il a envoyé, et calculer précisément le taux d'erreur binaire associé.

Les deux générateurs connectés au coupleur permettent d'émuler deux types d'interférences : des signaux permanents correspondant à des communications GSM public qui peuvent exister sur les canaux adjacents aux fréquences dédiées au GSM-R, et des signaux transitoires mesurés in situ lors des campagnes de mesures.

Bien évidemment, les signaux perturbateurs pouvant autant affecter les signaux descendant que montant, nous avons réglé la puissance du signal descendant, donc envoyé par la station de base, pour qu'elle soit bien inférieure à celle des signaux envoyés par le terminal. Ceci afin de s'assurer que seules les liaisons descendantes soient perturbées et ainsi faciliter l'interprétation.

Une règle d'estimation du taux d'erreur binaire pouvant être induit par les perturbations transitoires a été également établie [24] sur la base de quelques hypothèses, à savoir :

- La durée des interférences transitoires est très courte devant la durée de transmission d'un bit et peut être considéré tel un évènement ponctuel,
- Les interférences transitoires induisent dans la bande du GSM-R des puissances au moins identiques à la puissance du lien descendant
- L'apparition d'une interférence transitoire entraîne une décision arbitraire de l'estimation du bit auquel se superpose l'interférence.

Dans ces conditions, le taux d'erreur binaire peut être estimé ainsi :

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_r}{R_s}$$

V-2-15

Où R_r est le taux de répétition des interférences transitoire et R_s est le débit du système GSM-R ($R_s = 270.833$ kbits/s) et le facteur $\frac{1}{2}$ exprime une chance sur deux d'extraire le bon symbole.

Il faut garder à l'esprit que cette expression ne constitue pas une méthode absolue pour évaluer le BER à partir des caractéristiques des interférences transitoires. Cependant, en comparant les valeurs de BER obtenues par cette règle d'estimation sommaire, nous pouvons évaluer la pertinence des hypothèses posées quant à l'effet des interférences transitoires.

Pour illustrer ces travaux, les résultats obtenus avec deux types de signaux transitoires sont présentés. Le premier signal transitoire est un signal d'interférence qui a été recueilli à bord d'un train à la sortie d'une antenne GSM-R. Le second signal transitoire est un modèle générique proposé à l'issue d'une analyse statistique réalisée sur un grand nombre de signaux transitoires mesurés.

Ce second transitoire est un signal de forme double exponentielle filtré par un filtre passe bande 800 MHz - 1 GHz afin de concentrer la puissance dans la bande d'intérêt.

Le BER est ensuite mesuré sur une durée correspondant à 1200 trames GSM-R, en générant les signaux transitoires à intervalles réguliers. Les mesures de BER sont effectuées pour différents intervalles de temps entre les signaux transitoires successifs.

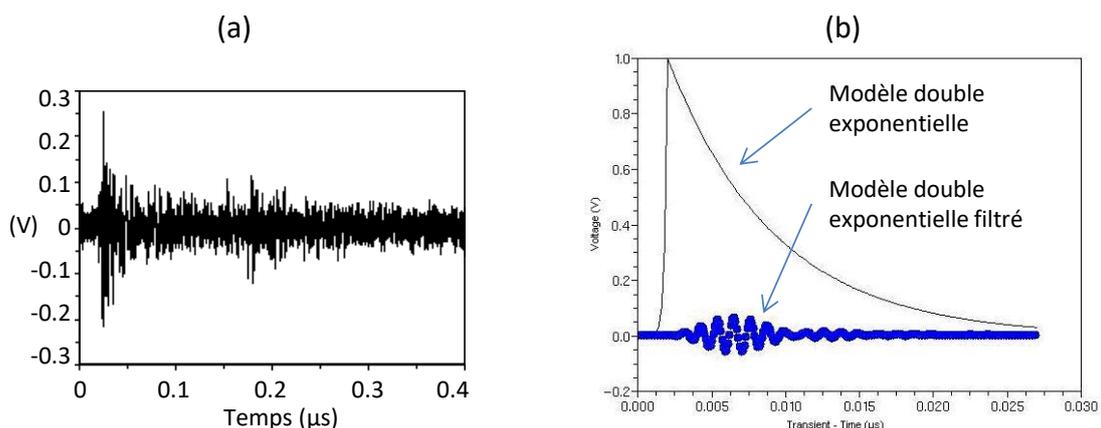


Figure 32 : (a) Signal d'interférence transitoire mesurée à la sortie d'une antenne GSM-R en toiture d'un train, (b) modèles du signal transitoire utilisé lors du test comparatif

La Figure 33 présente les valeurs de taux d'erreur binaire en fonction de l'intervalle de temps appliqué entre les interférences transitoires successives. Les trois courbes correspondent aux

résultats obtenus par calcul à partir de l'équation V-2-15, par mesure en appliquant le transitoire mesuré sur le train et par mesure en appliquant le modèle de signal transitoire.

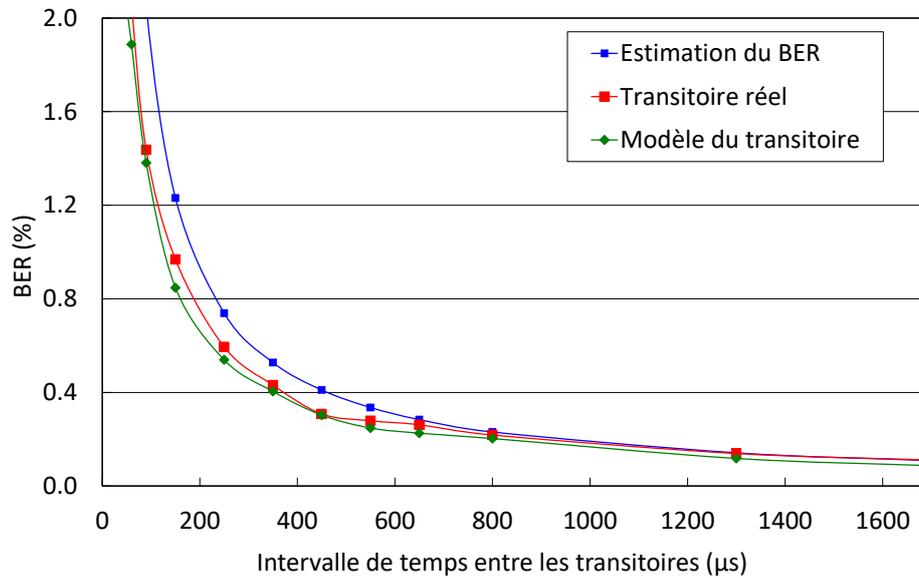


Figure 33 : Courbes de BER en fonction de l'intervalle de temps entre les signaux transitoires

Pour ce test, la puissance du signal de communication descendant était de -70 dBm et le niveau d'interférence produit par les transitoires sur le canal GSM-R était équivalent. Ainsi, à chaque apparition du transitoire, on relève un rapport SIR pour « Signal Interference Ratio » entre le niveau du signal et le niveau de l'interférence proche de 1 (ou 0 dB).

Dans ce cas, on peut observer, sur la Figure 33, que les résultats sont très proches qu'il s'agisse d'un transitoire réel ou bien du modèle. On note également que la règle d'estimation fournit une bonne indication de l'évolution du taux d'erreur dès lors que le rapport entre les niveaux du signal et de l'interférence est proche de 1.

En revanche, dès lors que le SIR diffère de 1, on observe un écartement des résultats par rapport à la courbe estimée. La Figure 34 montre cet écartement dans le cas où la puissance du signal GSM-R est de plus ou moins 5 dB par rapport à la puissance du signal d'interférence.

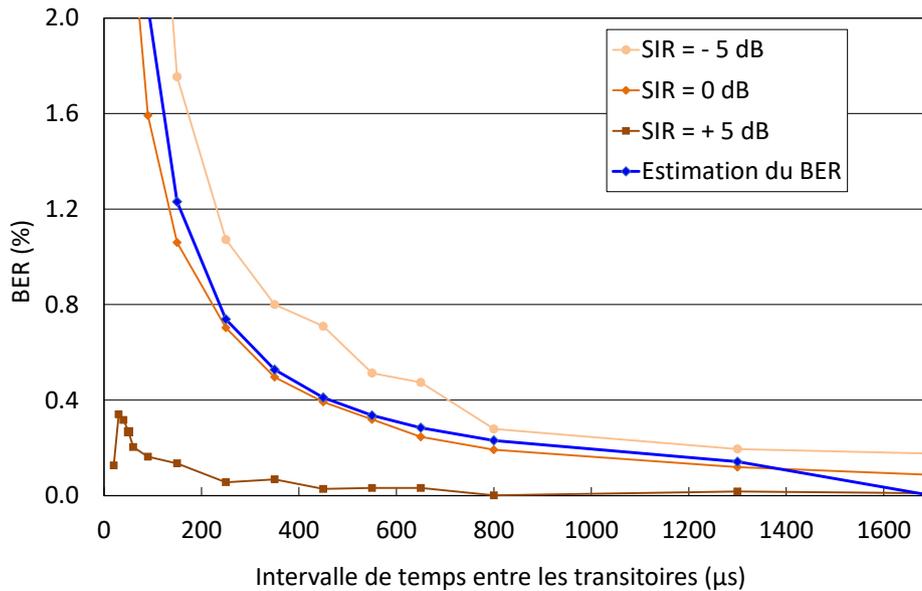


Figure 34 : Courbes de BER en fonction de l'intervalle de temps entre les signaux transitoires

La Figure 34 montre que lorsque le signal de communication dépasse le niveau des interférences transitoires de 5 dB, ces dernières deviennent inopérantes vis-à-vis du système de communication. Le taux d'erreur est quasi nul pour l'essentiel des intervalles appliqués. Il faut atteindre des intervalles inférieurs à 100 μs pour obtenir un BER significatif bien que limité.

En revanche, dès lors que les niveaux induits par les transitoires sur le canal de communication excède de 5 dB le signal utile, ils procurent un taux d'erreurs qui excède les valeurs estimées.

Ceci s'explique par le non-respect d'une des hypothèses associées à l'expression V-2-15, à savoir que le transitoire ne peut plus être considéré tel un évènement ponctuel. En effet, la durée du phénomène transitoire à l'entrée du terminal de réception est impactée par le filtre d'entrée du récepteur. Ainsi, un signal transitoire source de quelques nanosecondes peut s'étendre sur quelques μs au passage du filtre. Le niveau induit par le transitoires peut ainsi excéder le niveau du signal utile pendant quelques μs. Plus le niveau des transitoires est élevé par rapport au niveau du signal utile, plus la durée durant laquelle le SIR est inférieur à 1 est importante. Ainsi, lorsque le niveau induit par le transitoire est de 5 dB supérieur au signal utile, il le couvre pendant une durée d'environ 3.5 μs. Il est alors possible de deux bits successifs soient affectés par la présence du transitoire. L'estimation n'est donc plus valable. En revanche, on pourrait procéder à une nouvelle estimation du BER, en partant de nouvelles hypothèses. Nous n'avons pas encore approfondi cet aspect.

Ces travaux nous ont permis d'élaborer un banc de test fournissant des résultats répétitifs permettant de mener des études paramétriques afin d'identifier les facteurs les plus influents sur la dégradation de la qualité de la communication.

Nous avons également complété ces travaux en étudiant l'effet de la présence de communication GSM publics usant des fréquences adjacentes aux fréquences du GSM-R. Comme précédemment, la puissance du signal GSM-R à l'entrée du mobile a été fixée à -70 dBm. En parallèle, nous avons généré un signal GSM sur le canal 925.2 MHz. Nous avons utilisé le canal 925.2 MHz qui correspond au premier canal GSM adjacent à la bande de

fréquence GSM-R, imposant ainsi 400 kHz entre le canal GSM-R et le canal GSM public. Nous avons ensuite mesuré le BER induit sur les communications GSM-R pour différentes puissances du signal GSM public. Le résultat de la Figure 35 illustre ces travaux complémentaires.

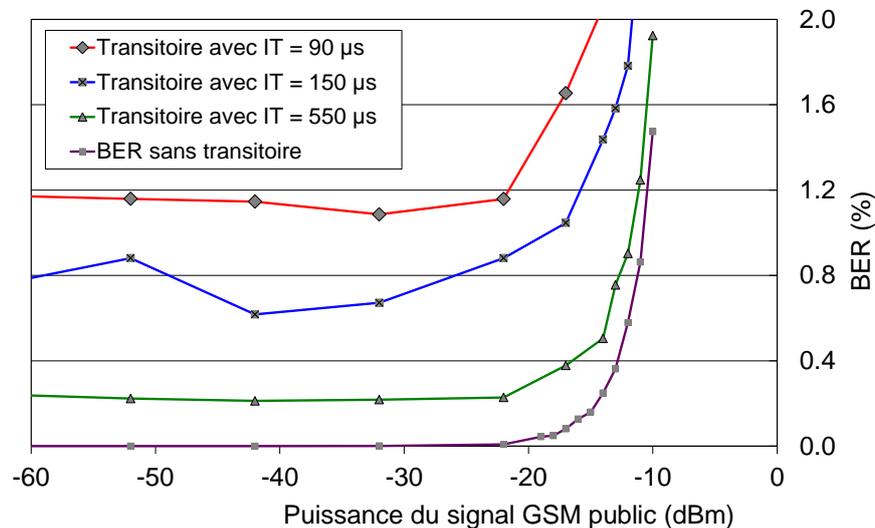


Figure 35 : Courbes de BER de la communication GSM-R en fonction de la puissance du signal de communication GSM sur un canal espacé de 400 kHz et en présence ou non d'interférences transitoires

Sur la Figure 35, la courbe violette présente l'évolution du BER en fonction de la puissance du signal GSM. Sur ce résultat, on remarque que la puissance du GSM public doit être supérieure à -20 dBm pour affecter le taux d'erreur de la communication GSM-R. Sachant que la puissance du signal GSM-R est de -70 dBm, cela correspond à une différence de 50 dB entre la puissance du GSM-R et les signaux GSM publics. Cette différence de 50 dB respecte précisément les spécifications préconisées par la norme ETSI EN 300 910. Celle-ci indique qu'un signal de communication doit pouvoir être reçu correctement en présence d'un autre signal d'une puissance supérieure de 50 dB présent sur un canal adjacent situé à 400 kHz d'écart en fréquence [25].

Les autres courbes présentent la même expérimentation mais en ajoutant la présence d'interférences transitoires. Les trois courbes correspondent à trois intervalles de temps (IT) différents entre les signaux transitoires successifs.

On remarque que toutes les courbes présentent un BER quasi-constant lorsque la puissance du GSM public est inférieure à -20 dBm. Par conséquent, cela signifie que lorsque la différence entre les signaux GSM-R et GSM publics est inférieure à 50 dB, seules les perturbations transitoires paraissent affecter le taux d'erreur des transmissions GSM-R.

En revanche, dans notre cas particulier, lorsque la puissance du signal GSM public dépasse -20 dBm, la dégradation de la communication dépend à la fois de la présence du signal de communication GSM et des interférences EM transitoires. Cette condition peut être rencontrée dans le cas où des BTS GSM sont placés à proximité des infrastructures ferroviaires.

Ces différents travaux ont fait l'objet de plusieurs publications [23][26].

V.3. La caractérisation des environnements EM transports

L'environnement électromagnétique (EM) auquel sont soumis les équipements électroniques et les systèmes de télécommunication dans leur usage quotidien est en constante évolution. Les évolutions technologiques des composants d'électronique bas niveaux ou de puissance, se répercutent également sur leur comportement EM en immunité et en émission. Par exemple, les augmentations des fréquences de commutation entraînent des phénomènes EM plus rapides et par conséquent plus étendus en fréquence.

On note également l'augmentation du nombre de sources de bruit en raison de la multiplication des services ou des fonctions offerts par les moyens de transports modernes et qui reposent sur des dispositifs électroniques et de télécommunication. Pour toutes ces raisons, l'environnement électromagnétique devient de plus en plus complexe à appréhender puisqu'il se compose d'une multitude de signaux électromagnétiques d'origine et de natures diverses.

En contrepartie, les contraintes EM auxquelles les équipements électroniques sont soumis lors des tests d'immunité peuvent sembler très figées. Elles sont définies avec précision dans les normes de CEM pour garantir la constance des conditions d'essai et la répétabilité des essais. On peut alors tendre vers une divergence entre les conditions EM mises en œuvre lors des tests d'immunité et les conditions électromagnétiques effectivement présentes dans les moyens de transports.

Ainsi, une partie de mon activité de recherche a porté sur l'amélioration de la connaissance de l'environnement électromagnétique transport en intégrant des analyses statistiques et la reproduction des contraintes EM des environnements réels en environnement contrôlé, c'est-à-dire en moyens d'essais électromagnétiques.

V.3.1. Caractérisation des perturbations EM rencontrées par les communications GSM-R

L'innovation technologique qui accompagne le déploiement du système européen de contrôle-commande des circulations ERTMS, se heurte notamment aux difficultés d'exploitation introduites par la pollution électromagnétique présente le long des réseaux ferroviaires européens. Outre les risques d'interférences avec des émetteurs extérieurs, le système ferroviaire, toujours en évolution, constitue lui-même, une source de perturbations électromagnétiques majeure dont l'intensité peut varier dans de grandes proportions en fonction de la localisation des observateurs.

Dans un tel contexte, certaines performances des systèmes de télécommunication, de plus en plus nombreux sur les véhicules, peuvent être fortement dégradées.

Dans le cas du système ERTMS, les communications entre l'infrastructure et les véhicules roulants sont réalisées par GSM-R et s'effectuent sur des radios fréquences proches de 900 MHz. Dans ces circonstances, et compte tenu de la petite taille des antennes GSM-R qui équipent les véhicules, il devient indispensable de déterminer les champs perturbateurs avec une résolution spatiale adéquate.

J'ai donc travaillé sur des méthodes d'investigation adaptées à ces environnements électromagnétiques complexes afin de collecter des données représentatives des risques

d'interférences avec les équipements de bord.

Sur ce sujet, j'ai encadré le travail de thèse de Nedim Ben Slimen [27] de décembre 2006 à décembre 2009, dont la direction a été assurée par Sylvie Baranowski de l'IEMN-TELICE.

V.3.1.1. Travaux expérimentaux et statistiques pour la caractérisation des interférences EM agissant sur les communications GSM-R

Un travail d'investigation a été mené pour caractériser de manière exhaustive les perturbations électromagnétiques qui sont reçues par les antennes GSM-R [28]. En particulier, dans le cadre du projet Européen RAILCOM de 2005 à 2009, plusieurs campagnes de mesures, dont sont issues les photographies de la Figure 36, ont eu lieu et de nombreuses mesures ont été réalisées afin d'établir les distributions statistiques des différents paramètres qui caractérisent les bruits EM. Nous avons en particulier mis en place des méthodes de mesures centrées sur les interférences EM permanentes ou bien transitoires. Puis, nous avons approfondi la connaissance des interférences électromagnétiques transitoires produites par le contact glissant, et donc imparfait, entre la caténaire et le pantographe.



Figure 36 : Photographies de campagnes de mesures à bord de trains

Nous avons mis en œuvre plusieurs bancs de mesures à bord d'un train (analyseur de spectre, oscilloscope, différents filtrages...) afin d'étudier les caractéristiques des perturbations transitoires reçues par les antennes situées en toiture d'un train, en raison de l'apparition des arcs produits lors du contact glissant entre la caténaire et le pantographe.

Des travaux complémentaires ont également été réalisés en laboratoire. A titre d'illustration, la Figure 37 représente un banc de mesures réalisé afin d'étudier les facteurs influençant les caractéristiques des perturbations transitoires reçues par une antenne située à proximité de la caténaire. Ce banc est constitué d'une longue ligne métallique activée par un pistolet à décharge électrostatique [29].

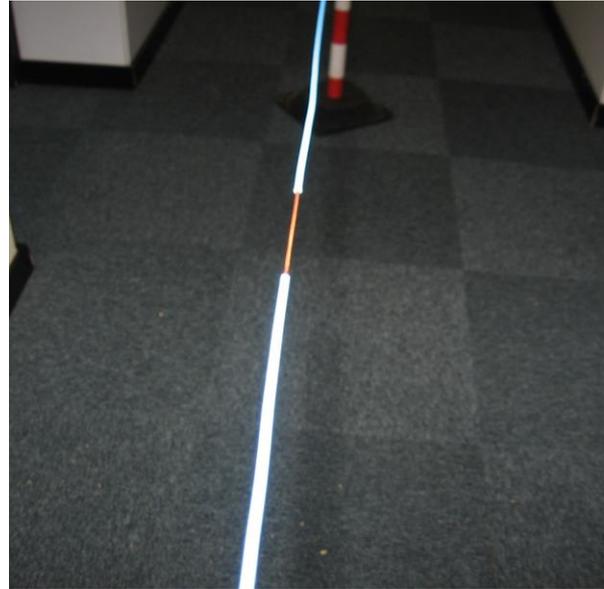


Figure 37 : Photographie d'une ligne déployée en laboratoire afin d'étudier les facteurs influençant les caractéristiques des interférences reçues par une antenne située à proximité.

Des analyses statistiques ont été menées sur les nombreuses mesures effectuées à bord des trains. En particulier, nous avons réalisé des programmes de traitement de données afin d'extraire les niveaux de puissance induites sur les canaux GSM-R, les temps de montée, les durées et les fréquences d'apparition des événements transitoires [28].

La Figure 38 représente, sur la partie gauche, la puissance du signal GSM-R reçu par l'antenne à bord du train au cours d'un trajet d'environ 20 km, comprenant cinq BTS GSM-R successives. La vitesse du train n'était pas constante, ce qui explique les espacements variables entre les puissances maximales obtenues lors du passage du train à proximité des BTS. La partie droite de la Figure 38, représente la puissance des interférences induites par des signaux transitoires successifs à l'entrée de l'antenne GSM-R dans la bande de réception.

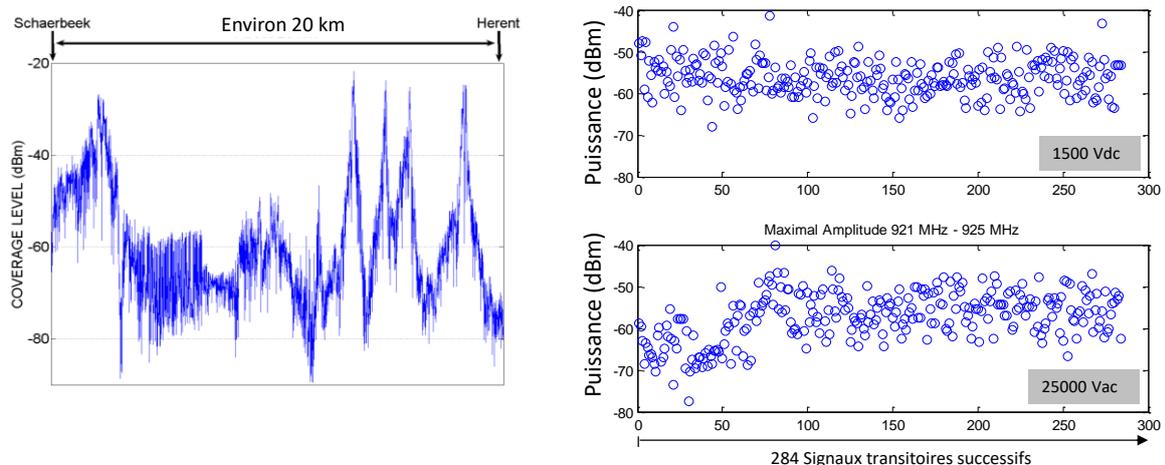


Figure 38 : À gauche, puissance du signal GSM-R reçu le long d'un trajet d'environ 20 km. À droite, puissance induite par 284 transitoires sur les canaux GSM-R sur une ligne ferroviaire à 1500 Vdc et une ligne à 25 000 Vac.

Sur ces résultats, on constate que les puissances induites par les interférences transitoires sont comparables aux puissances du signal GSM-R reçu.

La Figure 39 illustre les lois statistiques issues des analyses pour les temps de montée et les durées des interférences transitoires.

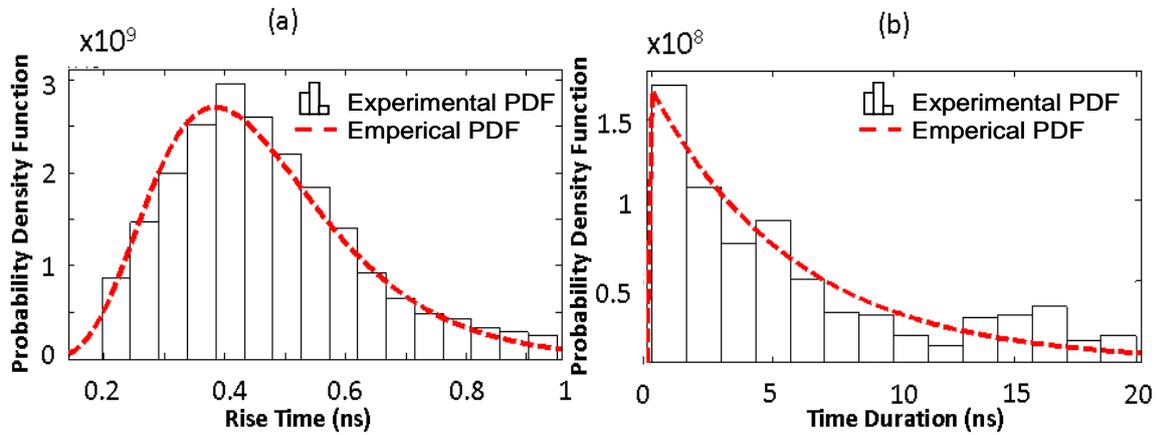


Figure 39 : Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des temps de montée (à gauche) et des durées (à droite) des événements EM transitoires mesurés lors de campagnes de mesure.

Ces travaux ont été fructueux en matière de résultats et de collaborations. Ils m'ont permis d'acquérir un savoir-faire dans la mise en œuvre de campagnes de mesures in situ et dans l'analyse de grandes quantités de données. Ces travaux ont conduit au dépôt d'un brevet en juillet 2008 portant sur un générateur de scénarios de bruits électromagnétiques respectant les caractéristiques statistiques observées in situ [30].

Il s'agissait de générer des scénarios représentatifs des observations en situation opérationnelle, pour qu'ils puissent être rejoués en environnement contrôlé pour valider l'immunité de certains équipements face à des contraintes proches des contraintes in situ. La définition des scénarios d'interférence s'appuie sur les lois statistiques des différents paramètres définissant les interférences transitoires [28].

V.3.1.2. Analyse des interférences reçues par les antennes en toiture du train en fonction de leur position

En complément de ces travaux expérimentaux et statistiques, j'ai également travaillé sur la réalisation de modèles de simulation afin de pouvoir évaluer l'impact de la position des antennes à bord des trains sur les interférences qu'elles subissent. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen TREND [32] qui portait sur la recherche des conditions « pire cas » pour mener des tests de CEM dédiés à la protection des systèmes de communication à bord des trains [33].

Un travail expérimental préliminaire a été réalisé sur un train à l'arrêt et des signaux transitoires ont été arbitrairement produits en activant le contacteur situé à bord du train en amont du pantographe, ainsi qu'en détachant et rattachant le pantographe à la caténaire.

Les interférences transitoires produites et reçues par différentes antennes situées en toiture du train ont été mesurées. Une antenne supplémentaire a été placée sur le côté du train, tel que le montre la Figure 40 et les interférences reçues par cette antenne ont été mesurées simultanément avec celles reçues par les antennes en toiture. Des mesures ont été effectuées pour différentes distances de cette antenne par rapport au pantographe.

Cette antenne, placée sur le côté du train, est une antenne large bande, présentée Figure 41, conçue à l'IFSTTAR par Jean-Pierre Ghys et caractérisée pour pouvoir, par la suite, réaliser un modèle de simulation fidèle. Les mesures réalisées avec cette antenne ont permis d'ajuster le modèle de la source d'interférence.

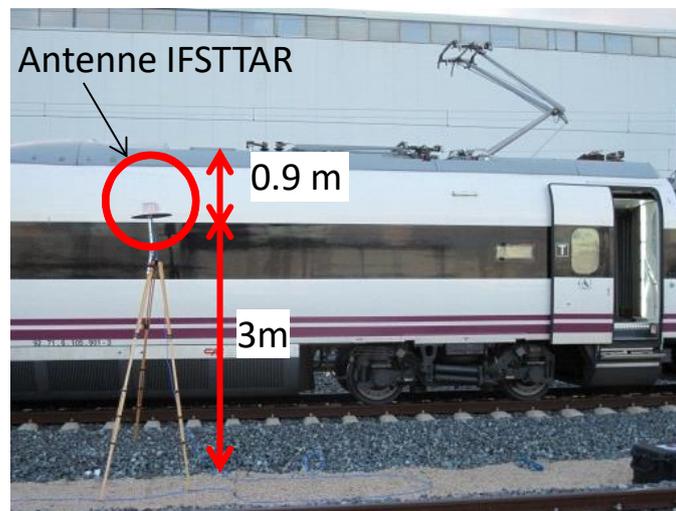


Figure 40 : Photographie de la configuration de mesures.

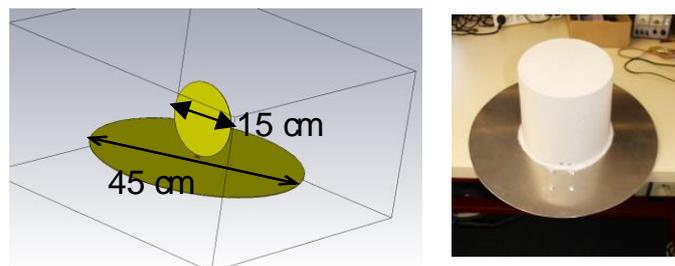


Figure 41 : Antenne utilisée en tant qu'antenne de référence.

Pantographe = position 0

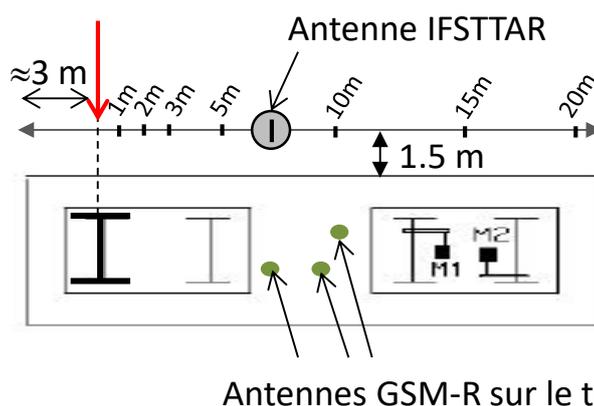


Figure 42 : Schéma des configurations de mesures en vue de dessus.

Pour cette étude un modèle, présenté Figure 43, représentant de manière simplifiée le toit du train a été réalisé avec le logiciel CST [34].

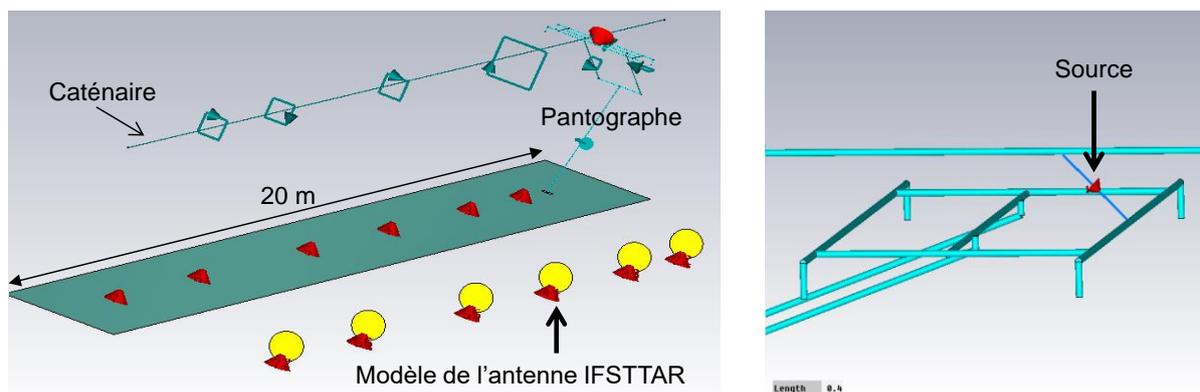


Figure 43 : Représentation du modèle réalisé sous CST.

Nous avons en première étape appliqué un signal transitoire à la source couvrant 1 GHz de bande de manière constante. Par l'exécution des simulations ; nous avons obtenu les signaux transitoires reçus par l'antenne de référence située à 5 m de l'axe du pantographe. Ceci a permis de calculer la fonction de transfert entre le signal source et le signal reçu par l'antenne IFSTTAR [35].

Ainsi, à partir de cette fonction de transfert et des signaux mesurés à l'aide de l'antenne IFSTTAR placée à 5 m de l'axe du pantographe, nous avons défini un signal de source au niveau du contact caténaire-pantographe, issu des mesures. Nous avons appliqué la fonction de transfert inverse aux signaux mesurés par l'antenne de référence lors des campagnes de mesures.

Nous avons ensuite utilisé les mesures effectuées à l'aide de l'antenne IFSTTAR mais aux autres positions, pour comparer les résultats de simulation et de mesures.

La Figure 44 compare les signaux mesurés et simulés en appliquant la source reconstituée à partir de la fonction de transfert, et reçues par l'antenne de référence lorsqu'elle est directement sur le côté du pantographe soit à la position 0 sur la Figure 42.

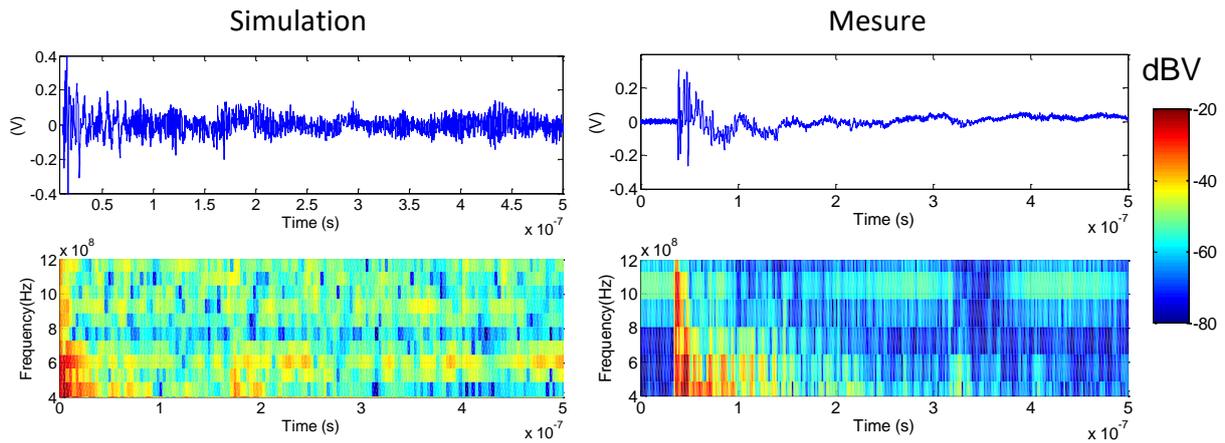


Figure 44 : Comparaison entre les signaux d'interférence reçus par l'antenne de référence obtenue par mesure et par simulation sous CST, à la position 0.

La Figure 45 compare la simulation et la mesure mais pour l'antenne placée à 10 m du pantographe.

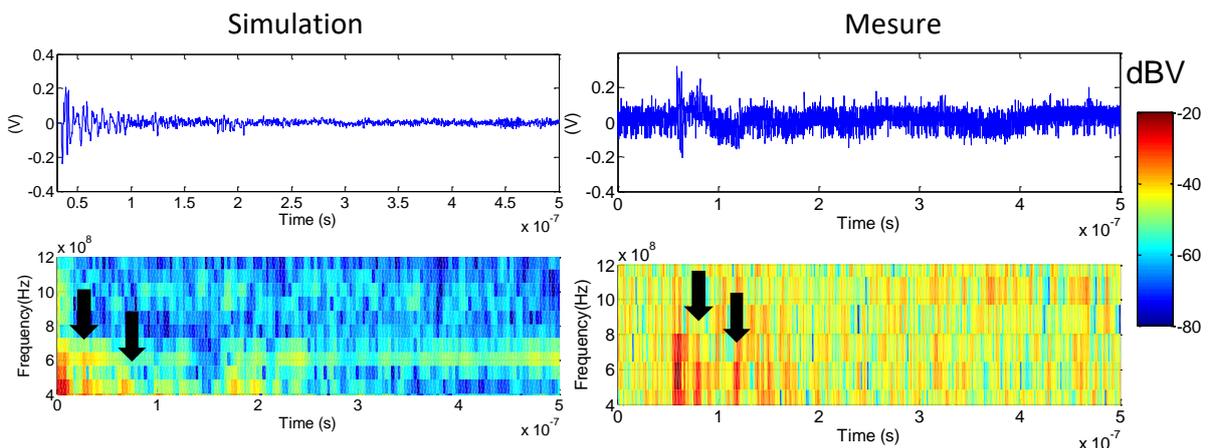


Figure 45 : Comparaison entre les signaux d'interférence reçus par l'antenne de référence obtenue par mesure et par simulation sous CST, à une distance de 10 m du pantographe.

Ces résultats montrent que les caractéristiques qui nous intéressent, à savoir la couverture spectrale du phénomène transitoire reçu, en fonction de la position de l'antenne de réception, est bien reproduite par la simulation. Les résultats à 10 m présentent également des signaux transitoires secondaires qui révèlent des points de réflexion dans la structure, bien reproduits par la simulation.

Sur la base de cette méthode, nous avons conservé le modèle de source et étudié l'impact de la position de l'antenne GSM-R en toiture sur le signal d'interférence qu'elle reçoit. Nous avons également pu multiplier les configurations par simulation pour étudier le couplage avec la caténaire et avec le pantographe.

Ainsi, nous avons pu constater que, dès lors que l'antenne est à une distance minimum de 5 m du pantographe, le niveau d'interférence induit sur les canaux GSM-R est stable quelle que

soit la distance. Ceci montre qu'à partir de cette distance le couplage s'effectue essentiellement avec la caténaire. Cela a également permis d'évaluer le gain qu'il y aurait à décaler l'antenne de l'axe de train, en la positionnant sur le côté de la toiture.

Tous ces résultats ont été regroupés dans des rapports du projet européen TREND [36], [37].

V.3.2. Caractérisation de la signature électromagnétique de l'infrastructure d'alimentation électrique ferroviaire

L'infrastructure d'alimentation électrique des trains constitue également une source de pollution EM pour les équipements ou installations situés au voisinage des lignes ferroviaires. Cependant, le comportement EM de cette infrastructure en émission est variable car il évolue en fonction de l'occupation de la ligne par les véhicules et en fonction des types de sous stations d'alimentation. Dans ce contexte, nous avons travaillé avec ALSTOM, le laboratoire IEMN-TELICE et l'école polytechnique de Turin pour mettre en place une méthode de caractérisation adaptée.

Il s'agissait donc de développer un outil de simulation numérique visant à modéliser la ligne d'alimentation pour tout type de transport guidé [38], [39]. Cet outil permet d'évaluer le champ magnétique produit dans l'axe de la ligne ferroviaire de 10 kHz à 2 MHz. Cependant, la modélisation complète du système d'électrification exige d'alimenter le modèle par des signaux fidèles aux signaux d'alimentation produits par les sous-stations d'alimentation ferroviaire.

Ainsi, en complément des travaux de caractérisation des interférences transitoires produites par le contact caténaire-pantographe, j'ai travaillé à la caractérisation des signaux d'alimentation générés par les sous-stations d'alimentation ferroviaire. Ce travail visait à caractériser la distorsion, à établir des modèles de ces signaux pour ensuite modéliser les émissions rayonnées de l'infrastructure d'alimentation électrique du réseau ferroviaire. Ceci constitue une autre approche pour caractériser l'environnement électromagnétique ferroviaire et comprendre les mécanismes qui sont à l'origine des émissions EM de l'infrastructure.

Ce travail a été mené dans le cadre du projet ANR CEMRAIL de septembre 2007 à avril 2011, dont les autres participants étaient ALSTOM, Réseau Ferré de France (RFF), le centre d'essais ferroviaire de Petite-Forêt (CEF) et le laboratoire IEMN-TELICE. Les travaux portés sur la modélisation du comportement de certains composants de sous-stations d'alimentation du réseau ferroviaire ont principalement été menés par le laboratoire TELICE et ALSTOM.

J'ai d'abord été en charge des procédés de mesures qui ont été appliquées lors des campagnes de mesures. Une première série de campagnes de mesures a eu lieu au centre d'essais ferroviaire de Petite-Forêt afin de lier les variations du champ électromagnétique observées et les signaux circulant dans les différents conducteurs électriques qui composent l'infrastructure. Puis, deux autres campagnes de mesures se sont tenues dans une sous-station d'essai de Trenitalia à Empoli. A l'issue de ces mesures, j'ai travaillé sur les méthodes d'analyse pour extraire des modèles représentatifs à intégrer dans les étapes de simulation.

Il s'agissait, d'une part, de caractériser et d'étudier les signaux d'alimentation qui sont fournis par les sous stations dans le domaine des fréquences de quelques kHz à quelques MHz, ainsi

que dans le domaine des temps. D'autre part, il s'agissait d'étudier comment le niveau de courant délivré par la sous-station impacte les différentes composantes spectrales et transitoires que comportent les signaux produits par les sous-stations.

La sous-station d'essai est équipée d'une chambre d'essais isolée, d'un redresseur triphasé pour générer une tension d'alimentation continue de 3000 V, d'un réseau d'inductances permettant de simuler différentes longueurs de ligne électrifiée et d'un réseau de résistances permettant d'atteindre différents niveaux de courant nominal. Cette sous-station d'essais permet ainsi de faire varier le courant délivré en modifiant la configuration du réseau de charges de dissipation local, représenté sur la Figure 46.

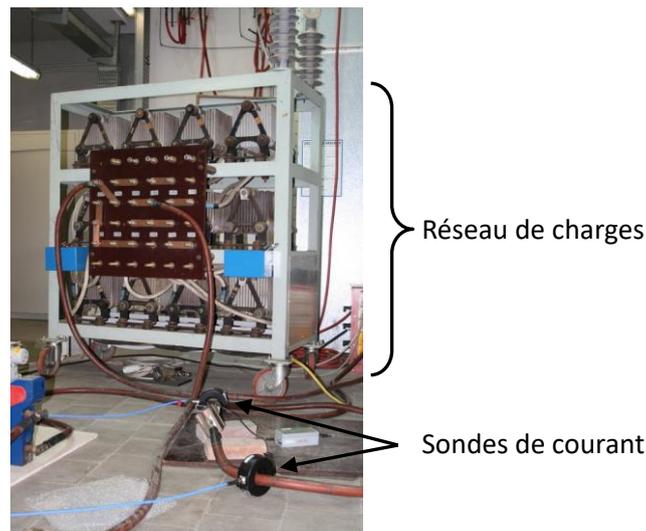


Figure 46 : Photographie du réseau de charges.

Dans une autre configuration, la sous station pouvait alimenter une courte ligne aérienne d'environ 57 m. Une extrémité de cette ligne est photographiée ci-dessous.



Figure 47 : Photographie de la ligne aérienne alimentée par la sous-station.

Quelques précautions ont dû être prises pour effectuer ces mesures. En effet, recueillir une caractérisation fine de quelques kHz à quelques MHz des signaux de distorsion qui accompagnent le courant électrique « nominal » particulièrement puissant, impose une méthode de mesure adaptée.

Ces mesures ont été effectuées avec des sondes prévues pour les fréquences de 10 kHz à 30 MHz, placées autour du câble alimentant les charges. La Figure 48 illustre la configuration utilisée lors des mesures [40].

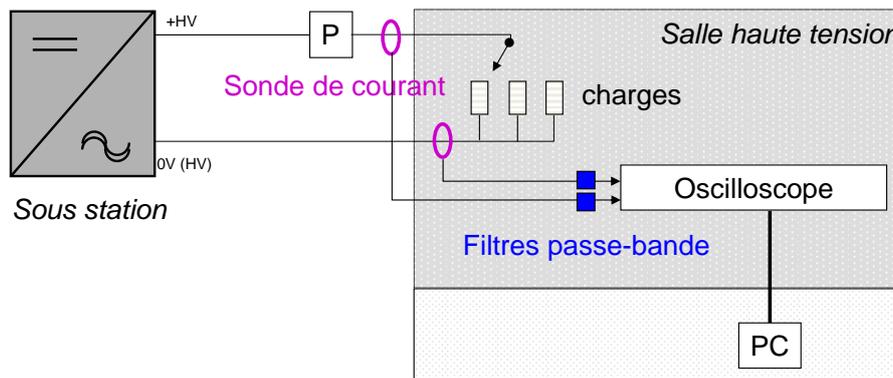


Figure 48 : Configuration des mesures en sous station

Les mesures ont été menées en utilisant un oscilloscope ayant une fréquence d'échantillonnage maximale de 20 GHz, une bande passante de 6 GHz, et une résolution de 8 bits. Sachant que la bande de fréquence à étudier s'étend de quelques kHz et quelques MHz, nous avons appliqué une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz pour analyser les signaux jusqu'à 2.5 MHz (condition de Shannon). Cependant, la bande passante de l'oscilloscope étant plus étendue, du repliement spectral peut apparaître. Un filtrage adéquat a donc été ajouté.

De plus, le signal acquis contient des composantes permanentes en basses fréquences (quelques centaines de Hz) de fortes amplitudes comparées aux composantes situées dans les fréquences supérieures que nous souhaitons étudier. Leurs fortes amplitudes empêchent d'utiliser une échelle suffisamment fine au niveau de l'oscilloscope, pour l'étude des composantes situées dans la bande de fréquences qui nous intéresse. Ainsi, cela se traduit par une résolution verticale insuffisante pour discerner les composantes hautes fréquences.

Par conséquent, nous avons inséré un filtre passe-bande pour ne conserver que la bande utile (quelques kHz à quelques MHz), et avons augmenté la fréquence d'échantillonnage à 20 MHz pour éviter tout repliement du spectre. Cette valeur de 20 MHz a été fixée en tenant compte de la bande passante des filtres passe-bande utilisés.

A la suite des mesures, nous avons procédé à des analyses temps-fréquences pour obtenir une bonne définition des signaux. Dans ce type de campagne de mesures, la quantité de données collectées est bien plus raisonnable que lorsque l'on mène des mesures à bord de trains en mouvement. Ainsi, nous avons procédé à des analyses temps-fréquences à partir d'une transformée de Fourier discrète, en adoptant des fenêtres de Hamming d'une durée variant avec la fréquence d'analyse. Puis, nous avons développé des méthodes de détection automatique au sein des données pour extraire des modèles d'intérêt pour notre étude.

V.3.2.1. Une analyse temps-fréquences des signaux

Nous avons appliqué une transformée de Fourier sur une fenêtre d'une durée proportionnelle à la fréquence analysée, reprenant ainsi le principe des ondelettes, ceci pour conserver les propriétés en temps et en fréquences du signal analysé. Tel que dans le cas des ondelettes, les fenêtres ont été centrées sur l'instant d'analyse pour ne pas entraîner de décalages temporels entre les bandes de fréquences qui peuvent être gênants pour l'analyse et détection automatique des résultats [41]. Pour le balayage en fréquence, nous avons utilisé un pas logarithmique. La fonction d'analyse est donnée par l'équation V-3-16.

$$R(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} Win((\tau - t) \cdot f) \cdot e^{i2\pi f(\tau - t)} d\tau \quad \text{V-3-16}$$

Où $R(t, f)$ est la réponse de l'analyse de la fréquence f à l'instant t et $Win(t)$ est la fenêtre temporelle d'analyse.

L'application de cette méthode permet de faire ressortir des composantes permanentes comme transitoires. Nous avons choisi dans l'exemple suivant une fenêtre de Hamming de durée $T = 3/f$. La Figure 49 présente le résultat de l'analyse appliquée à un fichier de mesures obtenu sans les filtres passe-bande.

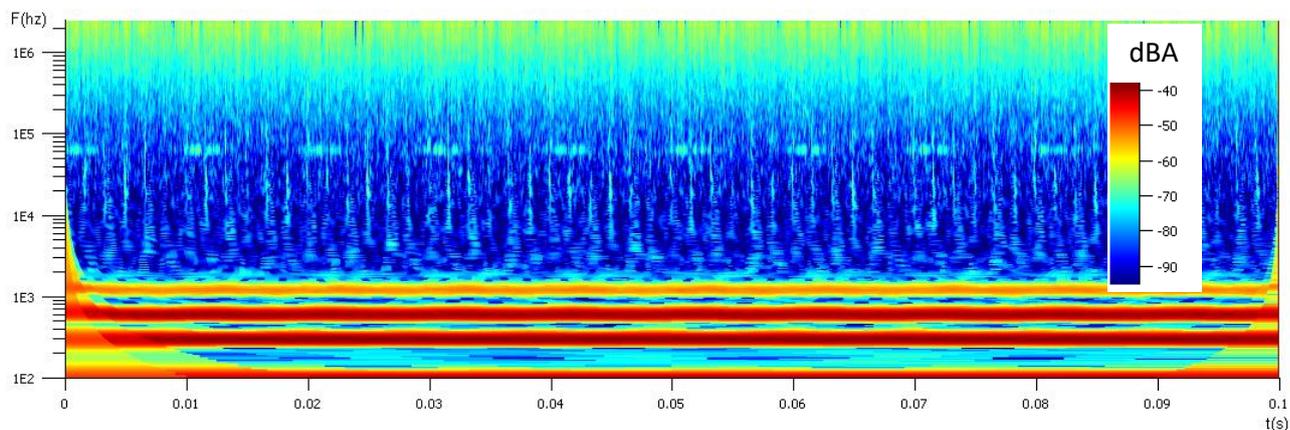


Figure 49 : Analyse temps-fréquences avec une fenêtre adaptative sur des mesures effectuées sans filtre.

Ainsi, on constate que l'analyse conduit à une représentation temps-fréquences précise mais on observe également que les fréquences les plus basses comportent des harmoniques très puissantes qui ont affecté la qualité des mesures. En effet, la résolution verticale de l'oscilloscope n'a pu être optimisée pour l'analyse des composantes hautes fréquences moins puissantes.

En revanche, le résultat de la Figure 50 obtenu en appliquant un filtrage pour s'affranchir des composantes très basses fréquences permet d'obtenir une meilleure définition des signaux

d'interférences dans la gamme de fréquences à étudier.

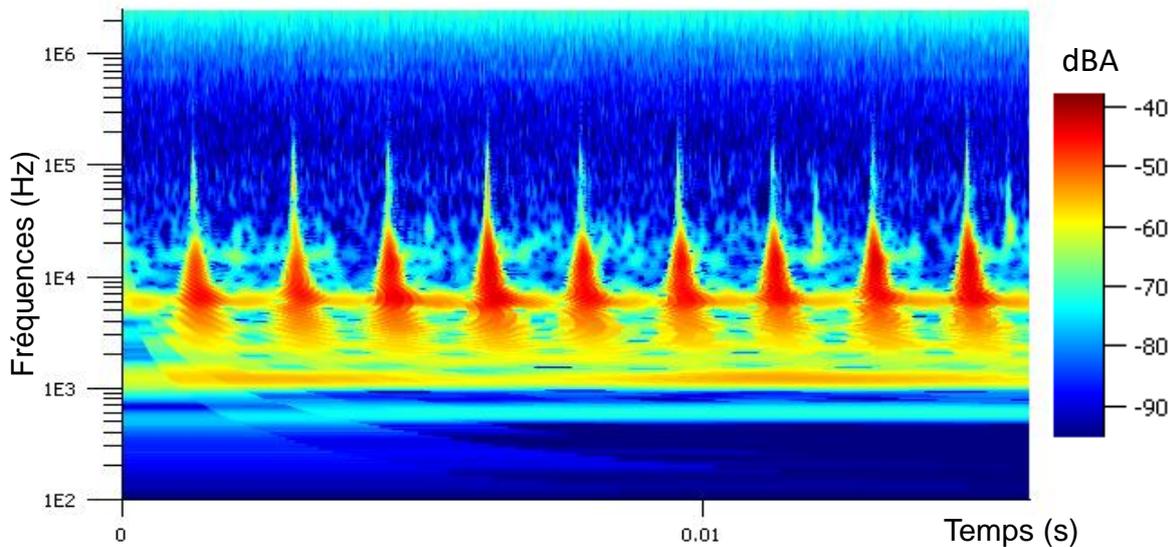


Figure 50 : Analyse temps-fréquences avec une fenêtre adaptative sur des mesures effectuées avec filtre passe-bande.

L'inconvénient de cette méthode réside dans son temps de calcul qui est long. Dans le cas où le recouvrement entre les fenêtres successives est de 70 %, le temps de calcul pour un fichier de 1 000 000 points est de l'ordre de 5 minutes. Nous avons, par la suite, optimisé cet aspect et travaillé sur une approche plus générale, dans le cadre d'un travail de thèse qui sera décrit dans la section V.3.3.

V.3.2.2. La détection automatique des interférences EM transitoires

La qualité des résultats obtenus a permis d'envisager une phase de lecture et de détection automatique des éléments « d'intérêt » parcourant l'ensemble des résultats. Dans cette étude, les éléments « d'intérêt » sont les signaux transitoires produits par la sous-station.

La phase de détection automatique vise donc la détection automatique des signaux transitoires et l'obtention de leur gabarit en fréquences. Ceci permet de conserver uniquement les données pertinentes à la construction de modèles en fréquences et de pouvoir comparer les modèles de transitoires obtenus en fonction de différents paramètres, tels que les valeurs des courants générés par la sous-station.

Nous avons développé un mode de détection dit « local » [43] qui repose sur les étapes suivantes :

- Découpe de l'espace temps-fréquences en bandes de fréquences en appliquant un pas logarithmique fixe ($f_{\min} / f_{\max} = Cste$).
- La largeur de la bande permet de comparer des valeurs d'énergie du même ordre.
- Analyse de la bande de fréquences sur une fenêtre de temps de taille appropriée aux fréquences de la bande. La largeur de la fenêtre de temps évolue de manière

inversement proportionnelle avec la bande de fréquences étudiée.

- Effectuer, au sein de cette fenêtre, les sommes des énergies sur les différentes fréquences correspondant aux mêmes instants, appelées sommes verticales, et les sommes des énergies des différents instants correspondant aux mêmes fréquences, appelées sommes horizontales.

Les sommes « verticales » S_V et « horizontales » S_H sont calculées par les équations V-3-17 et V-3-18.

$$S_V(t) = \sum_{f=f_{min}}^{f_{max}} R(t, f) \quad \text{V-3-17}$$

$$S_H(f) = \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} R(t, f) \quad \text{V-3-18}$$

Où, f_{min} et f_{max} sont les bornes en fréquence de la fenêtre d'analyse et t_{min} , t_{max} sont les bornes en temps de la fenêtre d'analyse.

La Figure 51 illustre les étapes listées précédemment au sein d'une fenêtre locale. Sur cette figure, le principe de découpage en fenêtres adaptatives est représenté par le quadrillage rouge.

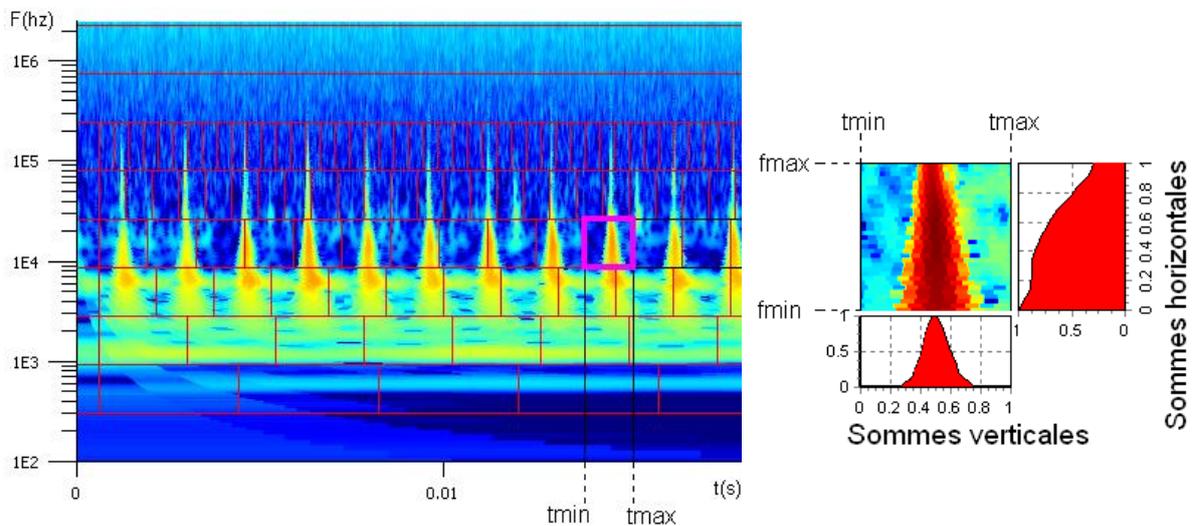


Figure 51 : Illustration de la fenêtre d'analyse locale et des sommes verticales et horizontales

Sur cette figure, les sommes horizontales et verticales sont divisées par leurs valeurs maximales (respectives) pour qu'elles deviennent des variables comprises entre 0 et 1. Cette représentation facilite l'utilisation de critères relatifs, au lieu de critères absolus.

En observant la Figure 51, nous constatons qu'un évènement transitoire se caractérise par une variation importante des sommes verticales et par une variation plus faible des sommes horizontales. La méthode de détection s'appuie donc sur les variations de ces sommes verticales et horizontales, en comparant les valeurs minimales et maximales de chacune

d'entre elles. En effet, en présence d'un évènement transitoire le rapport min/max des sommes verticales est proche de 0. En revanche, le rapport min/max des sommes horizontales sera plus élevé et pourra être proche de 1 dans le cas idéal.

Nous avons retenu trois critères permettant de détecter l'existence locale d'un évènement transitoire :

- Le maximum de la courbe des sommes verticales est situé au centre de la fenêtre, en procédant à un décalage fin des fenêtres. Ceci évite de détecter plusieurs fois le même évènement.
- Un rapport $\frac{\min_V}{\max_V} < T_V$ (T_V : seuil sur les sommes verticales)
- Un rapport $\frac{\min_H}{\max_H} > T_H$ (T_H : seuil sur les sommes horizontales)

Cependant, dans ces travaux des seuils T_V et T_H ont été fixés empiriquement en visualisant la réussite des détections. Le résultat de détection est retranscrit par un marquage vertical noir sur les représentations de la Figure 52.

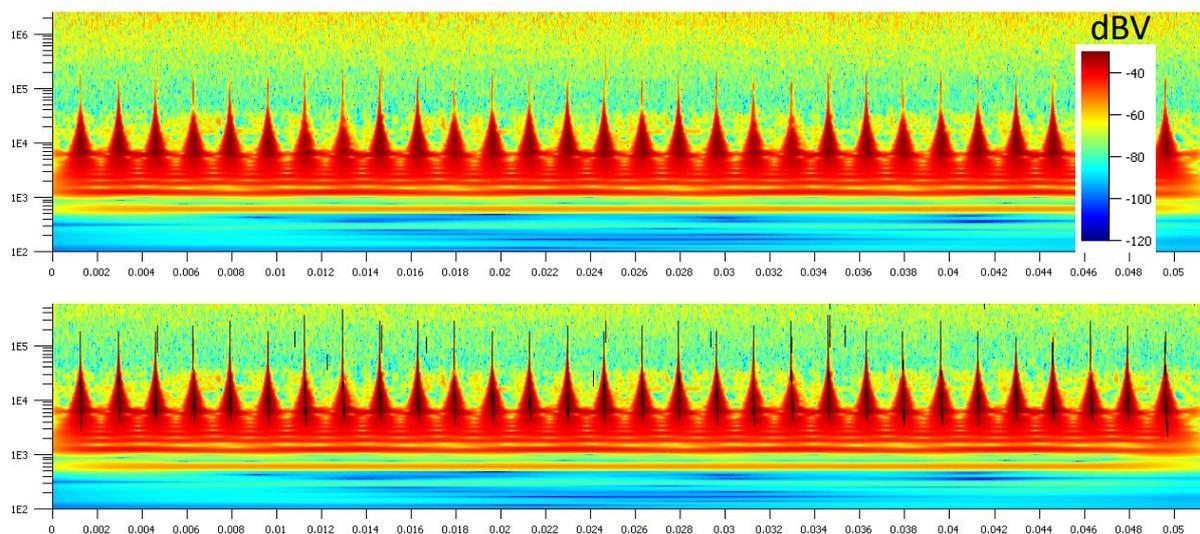


Figure 52 : Visualisation du résultat de la phase de détection automatique

Les gabarits spectraux issus de ces détections, ont permis de réaliser des modèles de sources. Ceux-ci ont été utilisés par le laboratoire TELICE pour simuler les émissions rayonnées par une ligne ferroviaire alimentée en extrémité par les modèles extraits des mesures et des analyses [42].

Cet outil a également été employé pour extraire de manière automatique les modèles des perturbations transitoires en fonction des niveaux de courant nominal produit.

V.3.3. Outil d'analyse temps-fréquences dimensionné pour les problématiques de

compatibilité électromagnétique

Dans ces travaux, nous avons constaté l'intérêt d'un outil de transformation temps-fréquences adapté à l'étude. Cependant, le temps de calcul de cet outil est relativement long. Dans le cas où le recouvrement entre les fenêtres successives est de 70 %, le temps de calcul pour un fichier de 1 000 000 points est de l'ordre de 5 minutes.

Ainsi, avec un financement de Railenium, j'ai encadré la thèse de Mohammed Raouf Kousri [44], dirigée par Marc Heddebaut et Sylvie Baranowski, qui a exploité les premiers travaux effectués dans CEMRAIL.

Mohammed Raouf Kousri a travaillé sur la généralisation de l'approche temps-fréquences pour traiter différents cas d'intérêt du domaine ferroviaire afin qu'elle puisse s'adapter à différentes bandes de fréquences et à la nature des signaux, tout en optimisant les temps de calcul. Mohammed Raouf Kousri a également étudié l'impact des configurations de calcul pour certaines applications ferroviaires.

Dans le cas des équipements de communication ferroviaires qui peuvent nécessiter une étude de CEM spécifique, il n'y a pas d'intérêt à mener une étude sur une très large bande de fréquences. Il n'est donc pas pertinent de procéder à une transposition en fréquences sur tout l'axe des fréquences allant des plus basses jusqu'à la fréquence d'échantillonnage divisée par deux. Dans nos études, les fréquences d'intérêt s'avèrent souvent être les plus hautes. L'échantillonnage de la mesure est fixé pour atteindre ces fréquences d'intérêt.

Nous appliquons une première étape avec l'équation V-3-19, qui représente la transposition en fréquences, mais la limitons aux fréquences d'intérêt que nous définissons par les fréquences basse et haute f_1 et f_2 .

$$\bar{x}[i, f] = x[i] \exp\left(\frac{-j2\pi fi}{F_s}\right) \quad \text{V-3-19}$$

Où i indique les échantillons, f la fréquence évoluant de f_1 à f_2 et F_s la fréquence d'échantillonnage. Au cours de cette étape, l'analyse n'est pas limitée par un pas en fréquence qui serait imposé par la taille de la fenêtre de temps choisie.

Cette étape permet de choisir la bande de fréquence dans laquelle varie f , de sélectionner un pas en fréquence pouvant descendre jusqu'à 1 Hz, et de garder ainsi la possibilité d'atteindre une résolution en fréquence optimale.

La matrice \bar{x} est un résultat intermédiaire. Les lignes de cette matrice correspondent aux différentes fréquences f allant de f_1 à f_2 , et les colonnes représentent l'évolution dans le domaine des temps du spectre du signal.

L'étape suivante qui consiste à réaliser une somme glissante, réintroduit le facteur temps. Il s'agit d'une convolution de chacune des lignes correspondant aux différentes fréquences f avec une fenêtre de temps de forme et de taille données.

Les fenêtres les plus courantes sont les fenêtres de Hamming, Hanning ou encore de Gauss. Toutes ces fenêtres conduisent à une résolution en fréquence intéressante¹. Cependant,

¹ Ici la résolution en fréquence est définie par la largeur du lobe principal et la différence entre le lobe principal

chaque décalage de la fenêtre sur les échantillons suivants exige de procéder à un calcul de convolution complet. En revanche, si nous optons pour une fenêtre rectangulaire dont la forme est constante en fonction du temps, le calcul de convolution précédent peut être exploité par le calcul suivant s'il y a recouvrement entre les fenêtres. En effet, réaliser une convolution avec une fenêtre rectangulaire permet de pouvoir adapter sa taille et choisir un pas de décalage de temps fin et ceci sans aucune répercussion sur la durée de calcul.

Cette étape permet d'obtenir le spectre $X(i, f)$ du signal $x(i)$, où i est la variable de temps et f la variable de fréquence. La convolution est réalisée avec une fenêtre rectangulaire d'amplitude constante égale à 1 et de largeur $w : \Pi_w(i)$. Ainsi, pour obtenir une valeur $X(i, f)$, il suffit de réaliser la somme des échantillons sur la largeur de la fenêtre comme décrit dans par les équations V-3-20 et V-3-21:

$$X(i, f) = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{x}(n, f) * \Pi_w\left(i + \frac{w}{2}\right)}{w} \quad \text{V-3-20}$$

$$= \frac{\sum_{n=i}^{w+i} \bar{x}(n, f)}{w} \quad \text{V-3-21}$$

Pour obtenir la valeur suivante $X(i+1, f)$, puisque la fenêtre est décalée d'un seul échantillon à la fois, le calcul de la somme sur la largeur complète w n'est plus nécessaire. Il suffit de soustraire le premier échantillon $\bar{x}(i, f)$ et de rajouter l'échantillon suivant $\bar{x}(i + w + 1, f)$, à chaque décalage de la fenêtre.

Le décalage d'un seul échantillon à chaque étape peut procurer une très bonne résolution en temps, et permet de conserver un nombre de calculs constant quelle que soit la largeur de la fenêtre d'analyse.

Ainsi, on obtient une grande flexibilité dans le choix des résolutions en temps et en fréquence. Toutefois, la résolution en fréquence réellement obtenue est limitée par l'existence de lobes secondaires significatifs dans le spectre de la fenêtre rectangle. Cela signifie, que l'on peut avoir une distribution avec des intervalles très petits entre les fréquences de calcul, mais des résultats partiellement faussés par le fait que les signaux présents sur une fréquence peuvent introduire des signaux résiduels sur les fréquences adjacentes.

Afin de remédier à cet inconvénient, une solution est d'appliquer plusieurs fois l'algorithme de convolution jusqu'à obtenir une résolution en fréquence satisfaisante. Le résultat de la convolution de deux fenêtres rectangulaires donne un triangle qui présente une meilleure sélectivité en fréquence que la fenêtre rectangle. En réalisant des convolutions successives avec des fenêtres rectangulaires de la même taille, les résultats obtenus se rapprochent de ceux obtenus par une fenêtre gaussienne. La diminution des lobes secondaires à chaque convolution supplémentaire est illustrée Figure 53.

et le lobe secondaire. Plus la différence est importante, meilleure est la résolution en fréquence.

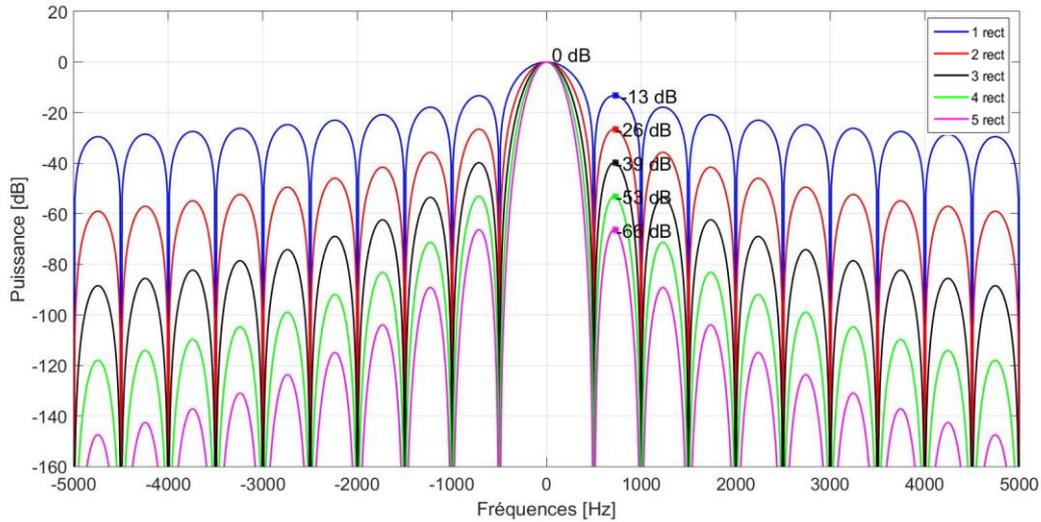


Figure 53 : Evolution du spectre de la fenêtre d'analyse en fonction du nombre de convolutions successives

Cependant, les convolutions multiples conduisent à un élargissement de la fenêtre de temps équivalente.

En conclusion, la flexibilité de cet outil nous permet d'adapter précisément le mode de calcul en fonction de l'information recherchée. En particulier, la configuration du calcul doit être adaptée selon que l'on cherche à analyser des signaux transitoires, ou bien des signaux permanents.

V.3.3.1. Utilisation de l'outil d'analyse temps-fréquences dans la bande du GSM-R

A titre d'illustration, cet outil a été appliqué à l'analyse de signaux modulés en GSM-R. La Figure 54 est une représentation temps-fréquences d'un signal GSM-R généré par un équipement CMU 200 de Rohde et Schwarz, en l'absence de toute perturbation. Ce résultat est obtenu par l'outil d'analyse exploitant une fenêtre de convolution de 2.9 μ s. La durée de 2.9 μ s correspond à la durée de la fenêtre après 3 convolutions [45].

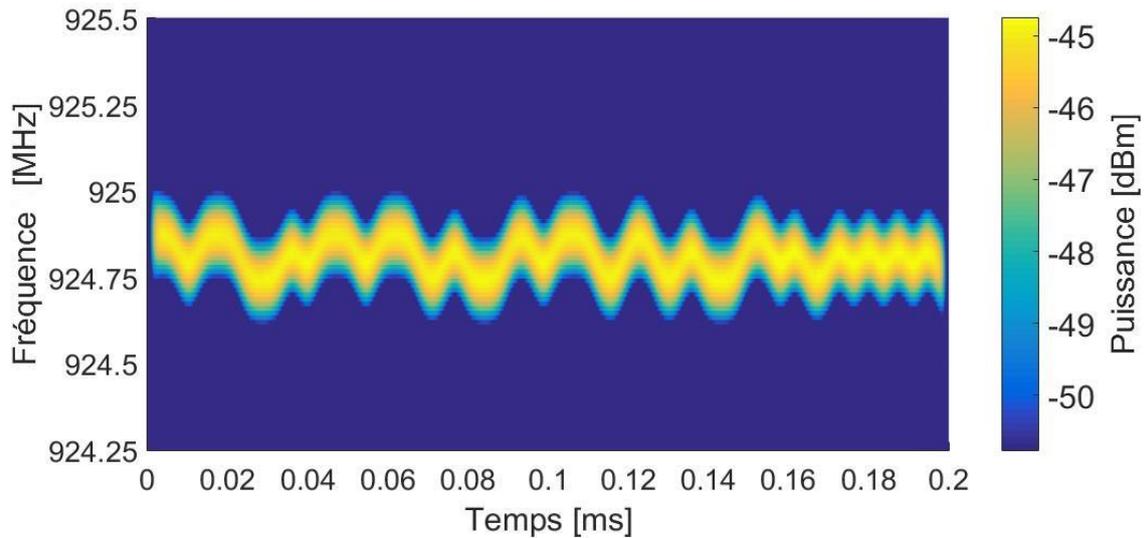


Figure 54 : Représentation temps-fréquences du canal GSM-R en l'absence de toute perturbation sur une durée de 0.2 ms.

Cette représentation permet d'observer très précisément l'évolution en fonction du temps du signal GSM-R, c'est-à-dire la variation de la fréquence de celui-ci à l'intérieur du canal dédié en fonction du débit binaire, sachant que la durée d'un bit est de $3.7 \mu\text{s}$.

Dans la suite, nous observons le comportement de l'outil d'analyse dans un autre cas ferroviaire en plus basses fréquences.

V.3.3.2. Utilisation de l'outil d'analyse temps-fréquences sur un signal eurobalise

Le système eurobalise [46] est employé dans le ferroviaire comme système de communication ponctuel. Il s'agit d'une balise placée entre les rails qui, au passage du train lui envoie notamment sa position précise, corrigeant localement la dérive d'odométrie.

Dans le cadre de sa thèse, Raouf Kousri a composé, sous Matlab, un signal comportant les caractéristiques des signaux de l'équipement eurobalise [44].

Afin de le synthétiser, un signal numérique composé d'une suite aléatoire de 0 et de 1 a été initialement créé. Il correspond aux signaux transmis depuis la balise vers l'interrogateur situé sous le train dont la durée des bits est de $1.76 \mu\text{s}$. Le signal numérique est ensuite modulé en fréquence (FSK) : les bits de valeur 0 sont associés à la fréquence 3.951 MHz, et ceux de la valeur 1 à la fréquence 4.516 MHz. La Figure 55 représente le signal numérique et le signal modulé en fréquence sur une durée de $50 \mu\text{s}$.

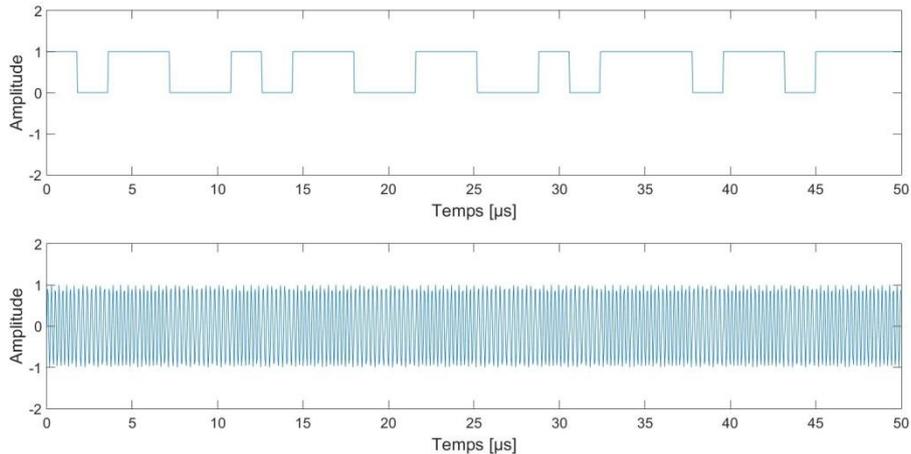


Figure 55 : Représentation en fonction du temps du signal numérique (en haut) et modulé en fréquence équivalent au signal uplink eurobalise (en bas).

Pour analyser ce signal, l'outil d'analyse temps-fréquences est configuré pour l'étude de la bande de fréquences de 3.5 MHz à 5 MHz, avec un pas de 7.5 kHz, soit 201 fréquences. Afin d'illustrer l'impact de la configuration de calcul sur les résultats obtenus, deux largeurs de fenêtres de convolution sont utilisées : 2500 échantillons, soit 0.1 ms et 44 échantillons, soit 1.76 μ s.

La première fenêtre, d'une durée de 0.1 ms, autorise une résolution en fréquence fine permettant de distinguer les composantes fréquentielles du signal. Quant à la seconde fenêtre, sa largeur de 1.76 μ s est équivalente à la largeur d'un bit de donnée eurobalise. Cette fenêtre permet d'améliorer la résolution en temps pour observer l'évolution dans le domaine des temps des différentes composantes du signal. La Figure 56 et la Figure 57 représentent les résultats associés à ces deux fenêtres. Chacune de ces figures, issues de la thèse de Mohamed Raouf Kousri, contient une représentation temps-fréquences du signal, son spectre, et l'évolution en fonction du temps sur 200 μ s des deux fréquences de modulation. Ces deux représentations reproduisent la méthode « zero span » utilisée en mesure avec les analyseurs de spectre, en fixant la fréquence centrale à 3.951 MHz pour le résultat de gauche et à 4.516 MHz pour le résultat de droite.

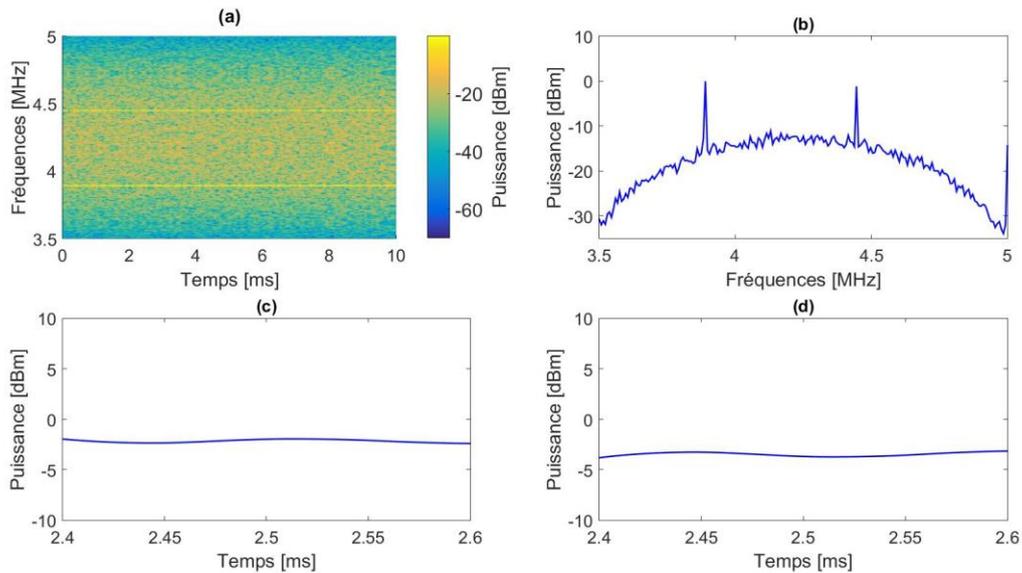


Figure 56 : Résultats obtenus avec une fenêtre de 0.1 ms : (a) Représentation temps-fréquences, (b) Spectre du signal entre 3.5 MHz et 5 MHz, (c) Évolution en fonction du temps à la fréquence de 3.951 MHz sur une durée de 200 μ s, (d) Évolution en fonction du temps à la fréquence de 4.516 MHz sur une durée de 200 μ s

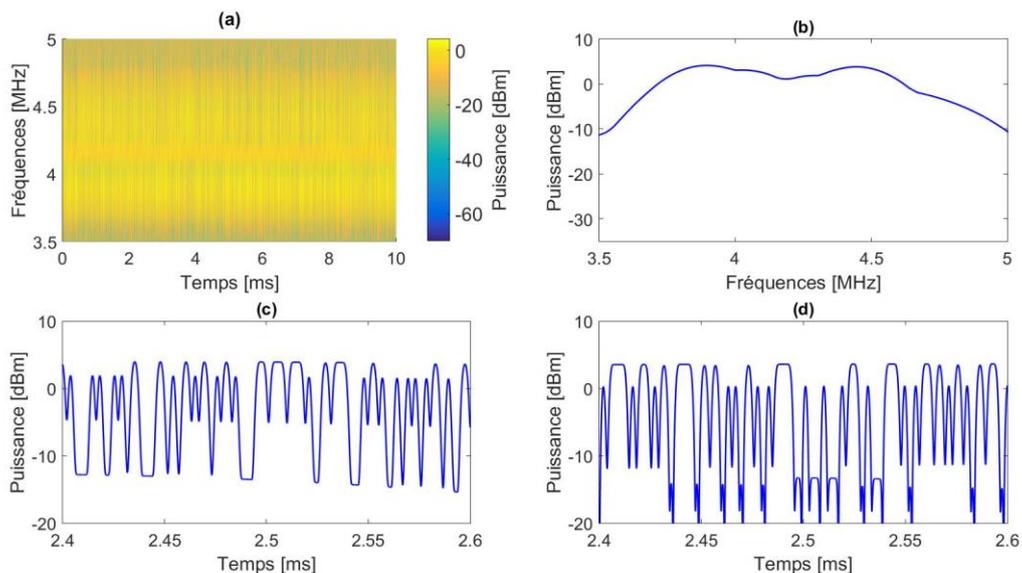


Figure 57 : Résultats obtenus avec une fenêtre de 1.76 μ s : (a) Représentation temps-fréquences, (b) Spectre du signal entre 3.5 MHz et 5 MHz, (c) Évolution en fonction du temps à la fréquence de 3.951 MHz sur une durée de 200 μ s, (d) Évolution en fonction du temps à la fréquence de 4.516 MHz sur une durée de 200 μ s

Figure 56, les résultats (a) et (b) permettent d'observer les composantes spectrales du signal entre 3.5 MHz et 5 MHz. Une fenêtre de 0.1 ms de largeur conduit à une résolution en fréquence suffisante pour distinguer les deux composantes fréquentielles. Par contre, dans le domaine des temps, les résultats (c) et (d) montrent une perte totale d'information.

Les résultats (a) et (b) de la Figure 57 avec la fenêtre de 1.76 μ s affichent une dégradation de

la résolution en fréquence. En revanche, les résultats (c) et (d) permettent d'observer finement les évolutions en fonction du temps du signal sur les deux fréquences de modulation, jusqu'à en reconnaître les bits de données.

Les figures 56(b) et 57(b) fournissent le spectre du signal (issu d'un procédé de max-hold) entre 3.5 et 5 MHz, et permettent de constater une augmentation de l'amplitude en utilisant une fenêtre de temps plus étroite. Ceci s'explique par l'étalement des spectres des fréquences de modulation sur les canaux adjacents, et qui est dû à la mauvaise résolution en fréquence obtenue avec la fenêtre étroite. La fenêtre large permet donc de mieux estimer les puissances associées à chaque fréquence.

Ainsi, en fonction des informations que l'on recherche, la taille de la fenêtre doit être judicieusement choisie. En effet, une résolution en temps de 1.76 μ s est efficace pour extraire les variations liées aux fréquences de modulation. Il faut cependant simultanément prendre en considération la résolution en fréquence pour s'assurer que les grandeurs obtenues sont correctes. Dans notre cas, il faut au minimum une résolution d'environ 565 kHz, ce qui correspond à la différence entre les deux fréquences de modulation (4.516 MHz – 3.951 MHz = 565 kHz). Ainsi, il n'existe pas de risque d'interférences entre les deux fréquences et le résultat obtenu est correct. Si l'on veut améliorer la résolution en temps en adoptant une taille inférieure à 1.76 μ s, alors la résolution en fréquence se dégrade suffisamment pour que les composantes fréquentielles interfèrent entre elles, faussant de ce fait les résultats.

V.3.3.3. Comparaison avec les résultats apportés par une transformée de Gabor

Dans le cas d'une transformée de Gabor [47], la FFT est appliquée et la fenêtre doit contenir un nombre d'échantillons correspondant à une puissance de 2. Ainsi, nous avons fixé la fenêtre à 64 échantillons, soit une durée de 2.56 μ s pour être au plus proche de la durée d'un bit tout en conservant une puissance de 2.

Pour comparer les résultats de notre méthode, nous avons adopté une taille de fenêtre de 66 échantillons, ce qui correspond à une durée de 2.64 μ s et une fenêtre rectangulaire initiale de 22 échantillons. Les figures 58 et 59 représentent respectivement les résultats obtenus avec la transformée de Gabor et avec la méthode développée.

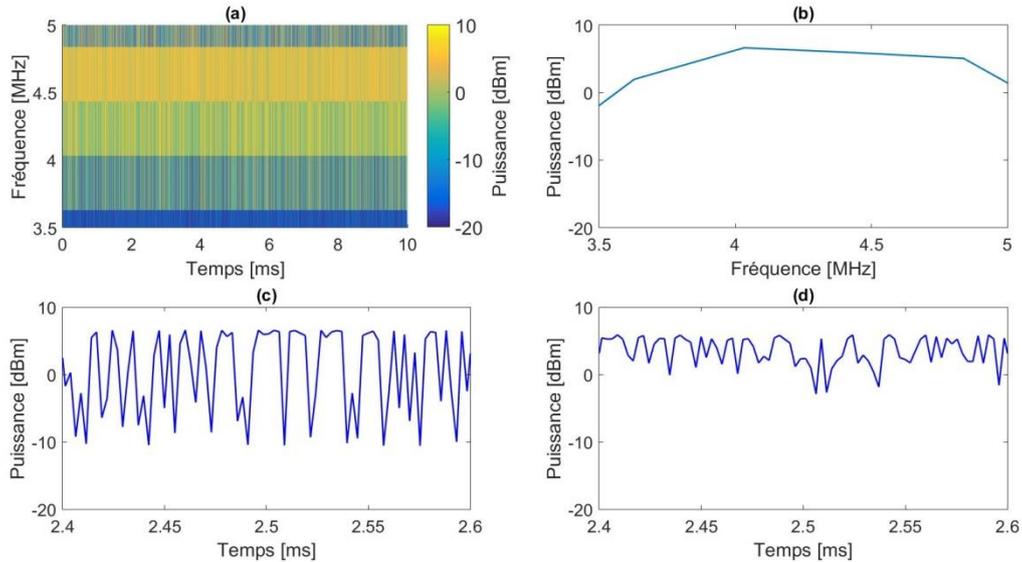


Figure 58 : Résultats de la transformée de Gabor appliquée sur une fenêtre de $2.56 \mu\text{s}$: (a) Représentation temps-fréquences, (b) Spectre du signal entre 3.5 MHz et 5 MHz, (c) Évolution en fonction du temps de la fréquence 4.032 MHz sur une durée de $200 \mu\text{s}$, (d) Évolution en fonction du temps de la fréquence 4.839 MHz sur une durée de $200 \mu\text{s}$

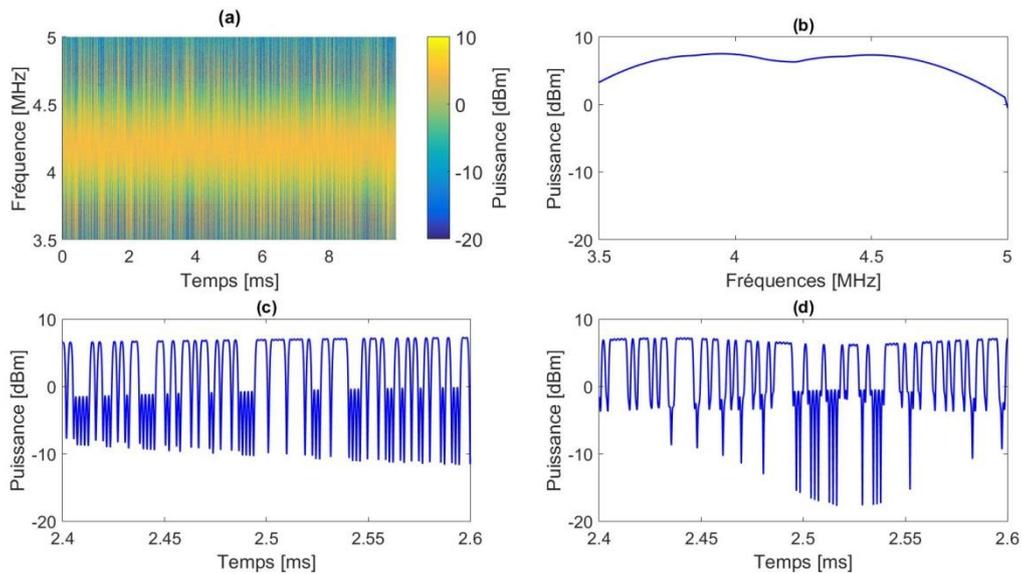


Figure 59 : Résultats de la méthode proposée sur une fenêtre de $2.64 \mu\text{s}$: (a) Représentation temps-fréquences, (b) Spectre du signal entre 3.5 MHz et 5 MHz, (c) Évolution en fonction du temps de la fréquence 3.951 MHz sur une durée de $200 \mu\text{s}$, (d) Évolution en fonction du temps de la fréquence 4.516 MHz sur une durée de $200 \mu\text{s}$

Outre la dégradation de la résolution en fréquence visible en (a) et (b) des deux figures, les résultats de la transformée de Gabor ne permettent pas une extraction des informations en fonction du temps, y compris en utilisant une résolution en temps satisfaisante. En effet, avec une taille de fenêtre de 64 points, le pas de fréquence est de 390.625 kHz . Ce pas est bien inférieur à l'espacement entre les deux fréquences du signal FSK, mais il ne permet pas de centrer le calcul sur les fréquences d'intérêt et donne les résultats de mauvaise qualité de la Figure 58(d).

Avec l'approche développée, bien que la représentation en fréquence soit dégradée, on parvient à extraire les informations contenues aux différentes fréquences, et ce grâce au fait que l'on dispose de l'accès à toutes les fréquences du signal. Figure 59, les informations binaires du signal eurobalise sont nettement visibles sur les résultats (c) et (d).

Concernant les temps de calcul des deux approches, dans le cas de l'outil proposé, ce temps dépend du nombre de fréquences analysées. Pour la transformée de Gabor, celui-ci dépend de la taille de fenêtre utilisée. En effet, cette transformée consiste à réaliser une FFT sur une fenêtre décalée le long du signal, plus cette fenêtre est petite, plus le nombre de FFT réalisées est grand.

La Table 5 groupe les temps de calcul avec une plate-forme matérielle identique, pour un calcul avec une fenêtre large, puis pour un calcul avec une fenêtre étroite.

Table 5 : Temps de calcul de l'outil proposée et cde la transformée de Gabor en fonction des tailles des fenêtres d'analyse utilisées

Méthode d'analyse	Temps de calcul	
	Fenêtre 81.9 μ s 2048 points	Fenêtre 2.56 μ s 64 points
Outil proposé	9.78 s	9.76 s
Transformée de Gabor	0.9 s	12 s

La transformée de Gabor bénéficiant de la FFT est beaucoup plus rapide que l'outil proposé si la fenêtre d'analyse est large. En effet, grâce à cette grande taille, le calcul de la FFT est effectué un nombre de fois limité. En réduisant la taille de la fenêtre, ce nombre augmente et le temps de calcul devient plus grand que le temps de calcul de l'outil proposé.

L'outil présente également un avantage, potentiellement important, qui réside dans la constance du temps de calcul. En effet, quelle que soit la taille de la fenêtre d'analyse, le temps de calcul reste quasi identique. Cette caractéristique permet des études de l'environnement électromagnétique dont les durées sont connues quel que soit le sous-système ferroviaire étudié et la bande de fréquence analysée.

Ces travaux ont été publiés dans le cadre d'un article qui illustre l'intérêt d'un tel outil pour surveiller l'effet des interférences sur les systèmes de communications ferroviaires [45]. Dans la section V.4.3.2, nous montrons comment cet outil peut être employé pour mettre en œuvre des stratégies de détection d'interférences.

V.3.4. Classification de bruits électromagnétiques en fonction de leurs effets sur les transmissions numériques

Les méthodes de mesures de bruit EM regroupées dans la standardisation CEM évoluent lentement. En effet, toutes reposent sur le balayage en fréquence du spectre qui est une

méthode bien maîtrisée et qui a l'avantage de fournir des résultats facilement comparables à des gabarits. Les gabarits définissent des niveaux d'émission maximaux pour une méthodologie donnée et sont bien adaptés au contrôle des sources d'émissions permanentes. Or, aujourd'hui, les sources de bruits évoluent et leurs caractéristiques en temps et en fréquences peuvent être très variables. De plus, lorsqu'on caractérise un environnement mobile tel que celui à bord d'un train en mouvement, la caractérisation est nécessairement incomplète en raison du temps de balayage de la méthode de mesure. En particulier, les perturbations transitoires ne sont pas mesurées, ou alors très partiellement [48].

Parallèlement, les signaux de communication à protéger possèdent des caractéristiques variables en fonction des protocoles et des déploiements des réseaux. Ainsi, il peut être difficile de savoir si un système de communication peut avoir un comportement satisfaisant dans un environnement donné et caractérisé à partir d'une mesure en balayage spectral.

En particulier si l'on pense au système de communication GSM-R, les communications en certains points du réseau ferroviaire peuvent être plus vulnérables à des interférences transitoires en raison de la couverture variable du réseau de communication.

En réalité, à chaque instant d'apparition d'une interférence transitoire, sa capacité à corrompre la communication dépendra à la fois de ces caractéristiques propres (puissance, bande de fréquence couverte, répétition) et des caractéristiques du signal de communication.

Ainsi, j'ai encadré la thèse de Stephen Dudoyer [49] afin de mettre en place une technique d'analyse capable d'extraire des données mesurées, des informations sur les interférences et sur le signal à protéger et de composer des indicateurs de qualité sur la base de ces informations. Ce travail adoptant des techniques de classification a été également encadré par Sébastien Ambellouis et dirigé par Marc Heddebaut.

La classification repose sur un apprentissage préalable [51]. Elle consiste à assigner une classe à une observation. Pour cela, il faut définir un espace dans lequel le problème de classification peut être résolu, c'est-à-dire dans lequel les différentes classes occupent des parties de l'espace différentes. Un tel espace est représenté par un ensemble de paramètres issus d'un ou plusieurs descripteurs. Les descripteurs peuvent eux-mêmes être calculés à partir de signaux observés.

Si l'on considère le GSM-R, un descripteur doit être une quantité, mesurée ou estimée à partir de signaux collectés, et qui s'avère représentative de tous les facteurs ayant une incidence sur la qualité de la communication. Puisque le processus de classification est basé sur le descripteur, celui-ci doit être soigneusement défini.

Pour ces travaux, le banc présenté Figure 31 a été employé. Ce banc de mesures a permis d'identifier les facteurs influents sur le taux d'erreur afin de converger vers un descripteur pertinent. Par exemple, la Figure 60 montre que pour un signal transitoire donné, à savoir amplitude et caractéristiques de temps fixées, le taux d'erreur dépend à la fois de l'intervalle de répétition des interférences transitoires et de la puissance du signal de communication.

Afin d'illustrer ce point, le résultat suivant présente trois courbes de taux d'erreur binaire (BER) obtenues en fonction de l'intervalle de temps entre les interférences transitoires successives. Les trois courbes correspondent à 3 valeurs différentes de SIR, rapport entre les puissances du signal GSM-R et du signal d'interférences.

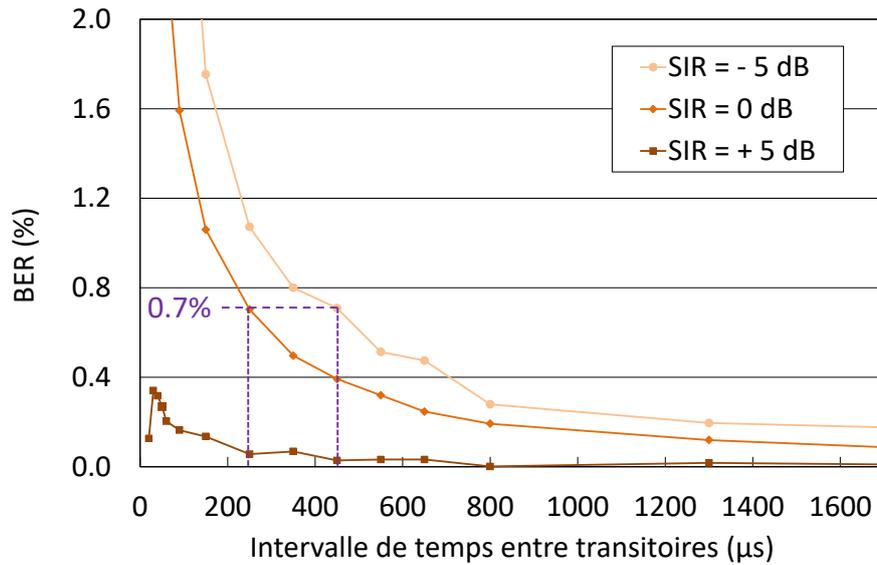


Figure 60 : Taux d'erreur binaire constaté sur une communication GSM-R en fonction de l'intervalle de temps entre les interférences transitoires successives et pour différents rapports SIR entre les puissances des signaux de communication et d'interférences

Ce résultat nous montre que différentes configurations peuvent conduire à un pourcentage d'erreurs identique. Un pourcentage d'erreur de 0.7 % peut être obtenu avec un SIR de 0 dB et un intervalle de répétition de 250 μs ou bien avec un SIR de -5 dB et un intervalle de répétition des interférences de 450 μs.

Ainsi, nous nous sommes orientés vers la définition d'un descripteur qui est construit à la fois à partir du rapport de puissance et de l'intervalle de répétition.

Le descripteur retenu et fourni par l'équation V-3-22, est le rapport entre la puissance du signal de communication et la puissance du signal d'interférence au cours du temps. Il s'agit de suivre ce descripteur avec un échantillonnage dans le temps suffisamment fin pour que distinguer une diminution significative de la valeur du descripteur à chaque apparition d'interférence transitoire.

$$D(t) = \frac{P_{GSM-R}(f_{GSM-R}, t)}{P_{interf}(f_{GSM-R}, t)} \quad V-3-22$$

P_{GSM-R} correspond à la puissance du signal de communication à l'instant t et sur le canal de communication et P_{interf} correspond à la puissance du signal transitoire d'interférence à l'instant t et induite sur la fréquence du canal de communication du GSM-R.

Ainsi, pour calculer ce descripteur il faut connaître les puissances correspondant au signal de communication et au signal d'interférences. Pour les obtenir, nous appliquons une transformée temps-fréquences sur les acquisitions effectuées à l'oscilloscope. Puis, dans la mesure où les interférences transitoires sont par définition large bande, nous estimons que la

puissance induite par les interférences transitoires sur les canaux GSM-R non occupés est identique à celle induite sur le canal utilisé par la communication, proche en fréquence. Nous retenons donc pour valeur de la puissance d'interférence, la puissance maximale obtenue sur les différents canaux de la bande GSM-R non occupés. Ainsi, le descripteur peut être obtenu par l'expression V-3-23.

$$D(t) = \frac{P_{GSM-R}(f_{GSM-R}, t)}{P_{\max \text{ sur les autres canaux}}(t)} \quad \text{V-3-23}$$

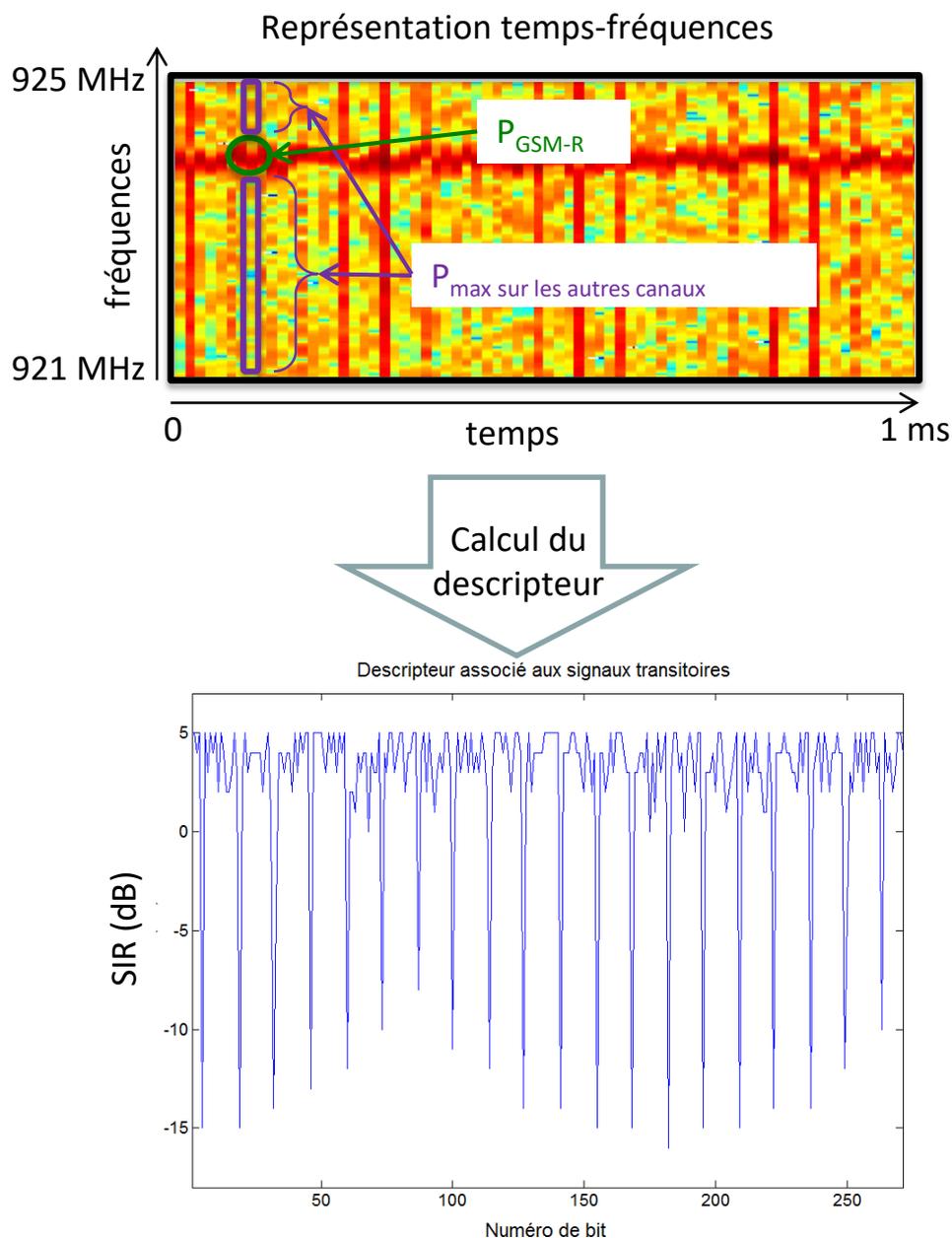


Figure 61 : Illustration du procédé de calcul du descripteur

À partir du descripteur, nous devons extraire des paramètres définissant l'espace des classes. En observant le descripteur Figure 61, nous constatons que l'apparition des signaux

transitoires se traduit par une diminution brutale de la valeur du descripteur. En conséquence, nous avons fait le choix d'extraire de ce descripteur le nombre de minima par fenêtre d'analyse, qui reflète la fréquence d'apparition des interférences et la somme de ces minima qui traduit le niveau de dégradation du rapport signal à interférence.

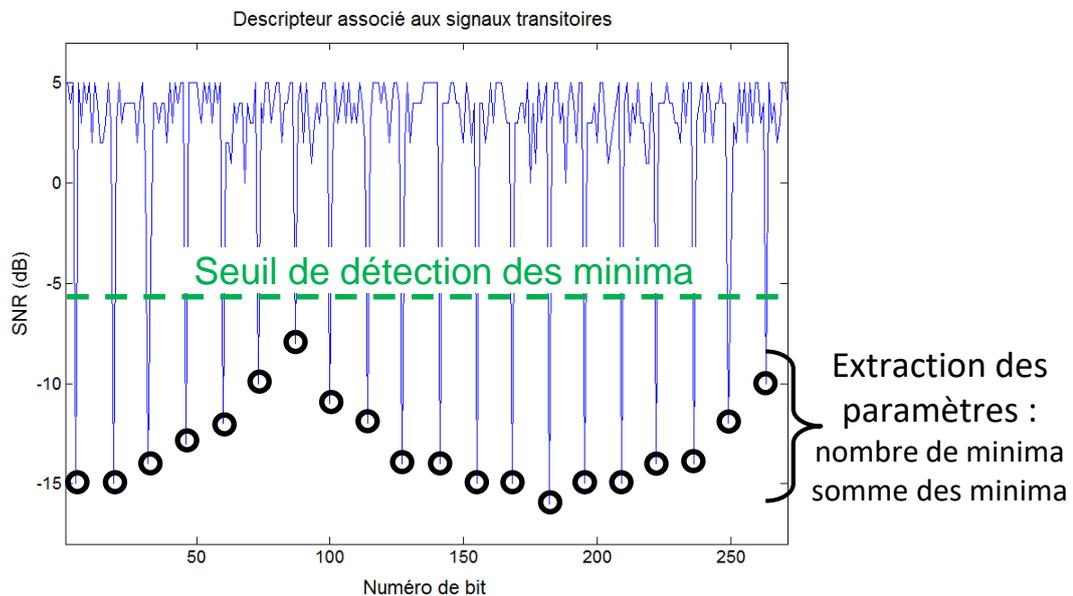


Figure 62 : Extraction des paramètres de définition de l'espace

Ainsi, chaque fichier de mesure obtenu est finalement considéré tel un couple de deux valeurs à savoir : la somme des minima et le nombre des minima.

Ensuite, dans une perspective de classification ultérieure, nous avons appliqué un grand nombre de scénarios en laboratoire en repartant du banc de test présenté Figure 31. Ce banc de test a été légèrement modifié pour y intégrer un oscilloscope à la place de l'analyseur de spectre et mesurer des fenêtres de 1 ms auxquelles est ensuite appliqué le calcul du descripteur et du couple (somme des minima, le nombre des minima).

La mesure en laboratoire permet d'appliquer des interférences EM et également de mesurer le taux d'erreur du signal reçu. Ainsi, en procédant parallèlement à la mesure du taux d'erreur binaire « BER », chaque scénario ou chaque fenêtre mesurée est « étiqueté » d'une mention « bon » dans le cas d'un $BER \leq 1.13\%$ et d'une mention « mauvais » dans le cas d'un $BER > 1.13\%$, selon la spécification ferroviaire EIRENE [21].

Ainsi, nous avons multiplié les scénarios et collecté le BER associé à chaque scénario. Nous avons également calculé le couple de donnée de temps (somme des minima, le nombre des minima) pour chaque scénario, sur une durée de 1 ms. Ceci constitue notre base de référence.

Eléments classe "bon" - BER \leq 1.13 %		
Mesure n°	Nombre de minima	Somme des minima
1	1	5.47
2	1	5.65
.	.	.
.	.	.
.	.	.
246	24	52.38
Eléments classe "mauv" - BER $>$ 1.13 %		
Mesure n°	Nombre de minima	Somme des minima
1	25	51.05
2	9	14.45
.	.	.
.	.	.
.	.	.
101	5	4.02

Figure 63 : Représentation d'une base de référence

Nous avons ensuite reporté chaque couple de valeurs dans le graphe de la Figure 64, appelé diagramme de dispersion. Les points bleus correspondent aux scénarios donnant un BER \leq 1.13% et les points rouges aux cas d'un BER $>$ 1.13%.

Cette représentation permet de déterminer si l'espace défini par nos deux paramètres est adapté à notre problème de classification. Ce diagramme permet de vérifier visuellement si nous obtenons une bonne séparation des classes et donc de juger de la pertinence des deux paramètres employés pour la classification.

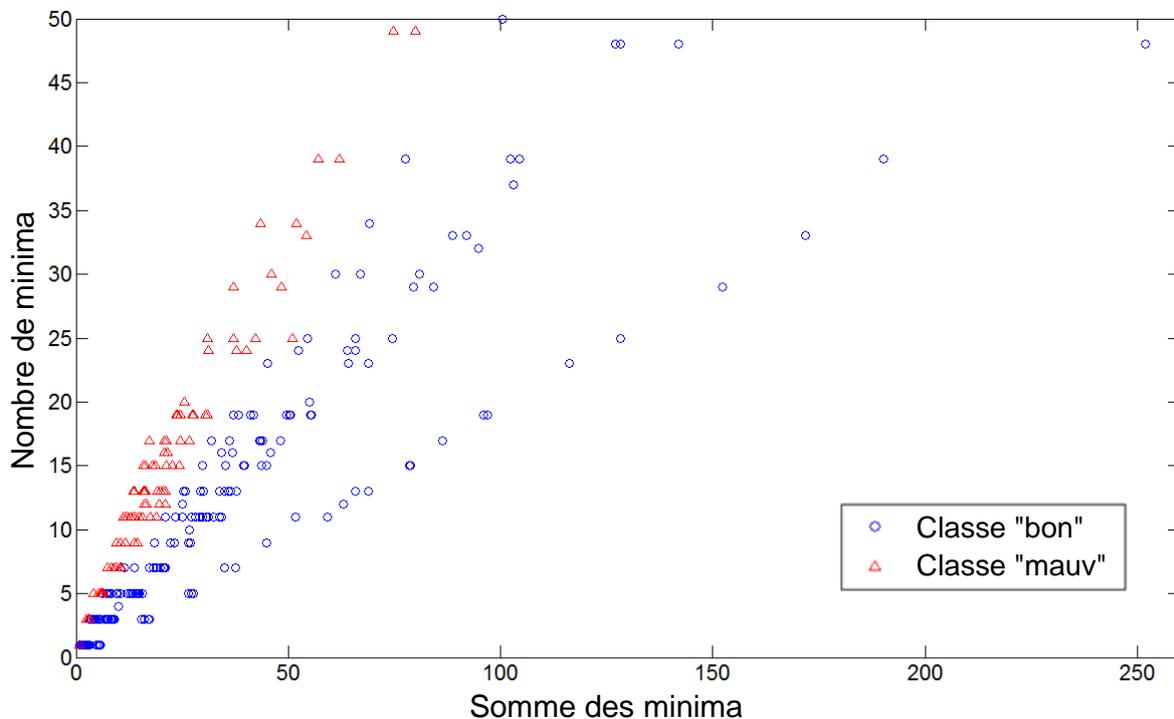


Figure 64 : Diagramme de dispersion de la base de référence

On constate ainsi une bonne séparation des classes qui montre la pertinence de notre descripteur et des paramètres extraits. Cette représentation permet d'attribuer la classe « bon » (pour bonne qualité de communication) à une partie de l'espace formée par les points bleus, et la classe « mauvaise » (pour mauvaise qualité de communication) à la partie de l'espace formée par les points rouges.

Ainsi, dans leur finalité, ces travaux peuvent permettre de procéder à des mesures dans le temps sur les antennes situées en toiture des trains et de venir reporter dans l'espace identifié, les paramètres issus des acquisitions au cours du déplacement du train. En fonction de leur position dans cet espace, l'acquisition révèle l'impact des interférences en présence sur la qualité de la communication position. De telles mesures pourraient permettre de diagnostiquer des défaillances constatées sur certaines sections du réseau ferroviaire où des communications dégradées apparaissent régulièrement.

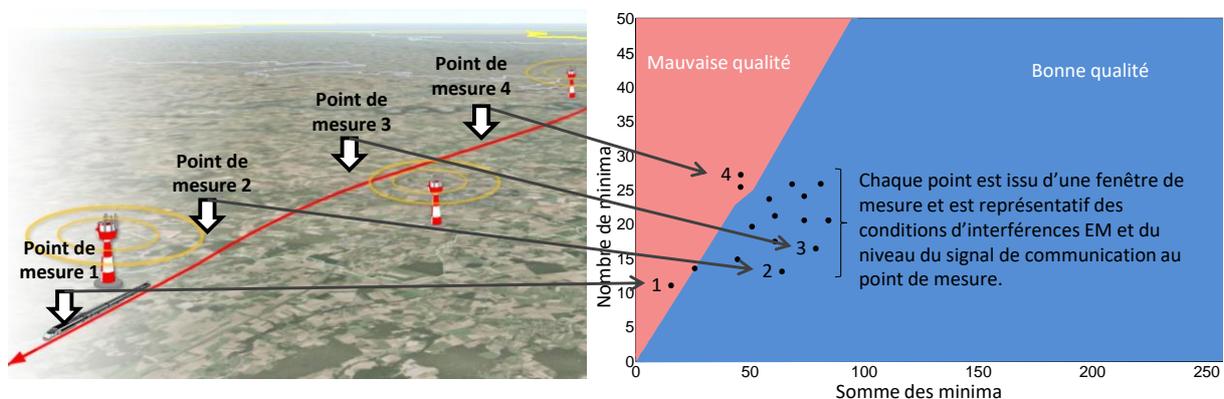


Figure 65 : Illustration de l'utilisation du diagramme de dispersion en environnement réel

J'ai ici présenté les grands principes de l'approche proposée et qui ont été publiés dans [50]. Cependant, d'autres travaux complémentaires ont été menés pour étudier la question du seuil qui permet la détection des minima. Ces travaux sur la définition du seuil et la fiabilité de détection des minima sont détaillés dans la thèse de Stephen Dudoyer [49].

V.4. Interférences EM intentionnelles et risques pour les transports

V.4.1. La vulnérabilité des transports face aux interférences EM intentionnelles

Au cours de nos travaux sur le GSM-R, nous avons pu constater sa vulnérabilité potentielle à des agressions EM et nous nous sommes progressivement interrogés quant aux risques que pouvaient représenter la présence de brouilleurs de communication à bord des trains. En effet, l'avènement d'actes terroristes sur notre territoire, entraîne de nouvelles problématiques de sûreté, y compris la vulnérabilité des systèmes de communication face à des actions malveillantes [53].

Ainsi, face à la motivation de la SNCF pour traiter cette question, je me suis impliquée dans le montage d'un projet européen pour lequel j'ai été coordinatrice scientifique d'août 2012 à novembre 2015.

Aujourd'hui, tous les moyens de transports évoluent avec une dépendance croissante aux systèmes communicants. Le brouillage électromagnétique peut donc constituer un moyen efficace de dégrader leur fonctionnement. Dans le cas du transport ferroviaire, le GSM-R est dédié à transporter des informations de signalisation de l'infrastructure vers le train et son interruption n'est pas tolérable au-delà de quelques secondes. L'interruption de la liaison connectée GSM-R entraîne donc rapidement un freinage d'urgence pour mettre le train en sécurité.

Les interférences EM intentionnelles auxquelles je me suis intéressée, sont constituées des signaux émis par des brouilleurs de communication d'une puissance limitée à quelques W. Les travaux que nous avons menés sur des installations réelles en employant des stations de bases d'essais et des cab radio fournis par ALSTOM, ont malheureusement permis de démontrer que, même avec ces puissances relativement faibles, ces dispositifs de brouillage étaient en capacité d'interrompre la liaison GSM-R.

V.4.2. Etudes de vulnérabilité des protocoles de communication face aux interférences EM intentionnelles

Dans le cadre de mes travaux sur la vulnérabilité des protocoles de communication, j'ai principalement étudié le cas du GSM-R dans le cadre du projet SECRET et de l'encadrement de la thèse de Souhir Mili, ainsi que le cas du Wi-Fi dans le cadre du projet SECOURT et de la thèse de Grecia Romero.

Le GSM-R constitue un cas d'étude concret présentant des risques réels. En effet, dans le cadre de différents échanges que j'ai pu avoir avec des personnels de la SNCF, nos collègues ont évoqué le fait qu'ils s'interrogeaient quant aux conséquences que pourrait avoir l'activation d'un brouilleur à bord d'un train sur les communications GSM-R.

Mes travaux sur la vulnérabilité du Wi-Fi ont été menés avec une motivation un peu différente. Le Wi-Fi présentait un intérêt pour plusieurs raisons. D'une part, il est tout à fait intéressant d'étudier un cas employant une modulation OFDM puisque les communications 5G à venir emploieront cette modulation. D'autre part, l'ITS-G5 qui commence à équiper certaines sections routières et certaines voitures pour permettre des communications entre

automobiles et entre automobiles et infrastructure, repose sur les grands principes du Wi-Fi, avec quelques spécificités complémentaires pour la mobilité. Enfin, la SNCF souhaite pouvoir proposer le Wi-Fi à bord de 80% de ses trains 2020. En effet, l'accès à internet dans les moyens de transport ne peut plus être considéré comme un service superflu. L'accès à internet devient essentiel pour maintenir l'attractivité d'un moyen de transport. Sachant que la vitesse des trains n'augmentera certainement plus dans de grandes proportions, il faut permettre au voyageur d'optimiser le temps passé à bord et de pouvoir notamment y travailler dans de bonnes conditions de connectivité.

V.4.2.1. Les interférences électromagnétiques intentionnelles considérées

Dans le cadre du projet SECRET et de la thèse de Souhir Mili, un travail bibliographique a été mené pour identifier les différentes classes de brouilleurs existantes. Dans la littérature, nous avons constaté que les brouilleurs pouvaient être classés sous un grand nombre de catégories selon les auteurs. Les brouilleurs peuvent ainsi être classés en fonction de la nature du signal qu'ils émettent (large bande, bande étroite, transitoire, permanent...), en fonction de la façon dont ils agissent sur le lien de communication (corruption des données, corruption du signal de synchronisation, spoofing...) ou encore en fonction de leur propriété (action sur le lien montant ou descendant, brouillage permanent ou brouillage à la détection de communication,...) [54][55][56][57][58][59].

Cependant, la recherche que nous avons menée sur internet pour nous procurer des brouilleurs, a finalement montré que tous les brouilleurs que nous pouvions obtenir fonctionnaient de façon similaire. Il s'agit de brouilleurs qui émettent une onde entretenue non modulée qui balaie très rapidement les bandes de fréquence des systèmes de communication.

Pour illustrer la nature des signaux produits par ces brouilleurs, nous avons caractérisé à l'aide d'un analyseur de spectre et d'un oscilloscope, le signal à la sortie des ports du brouilleur. Le brouilleur étudié comporte 8 ports de sortie d'antenne. Nous avons donc raccordé successivement les 8 ports des antennes à l'équipement de mesures.

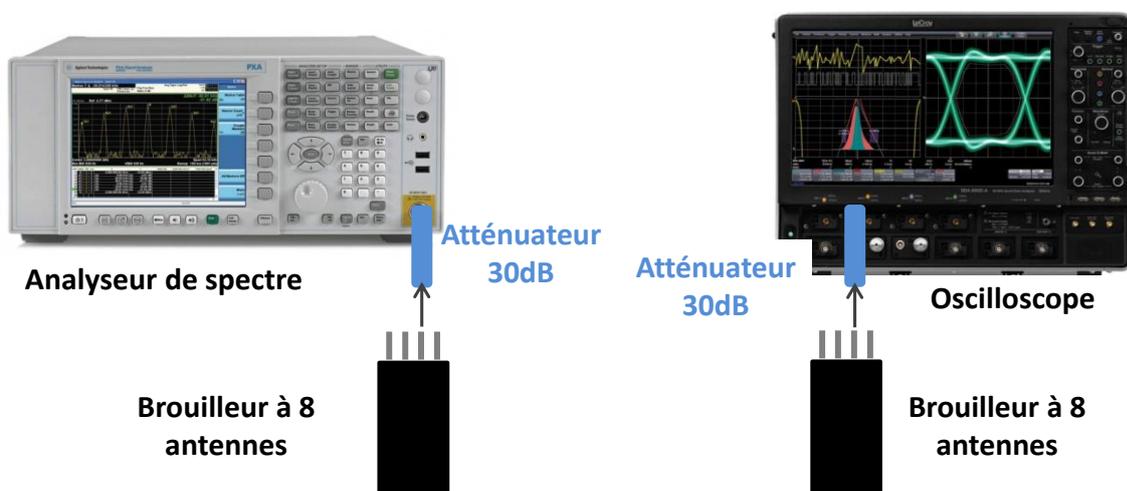


Figure 66 : Caractérisation des signaux produits par les brouilleurs étudiés

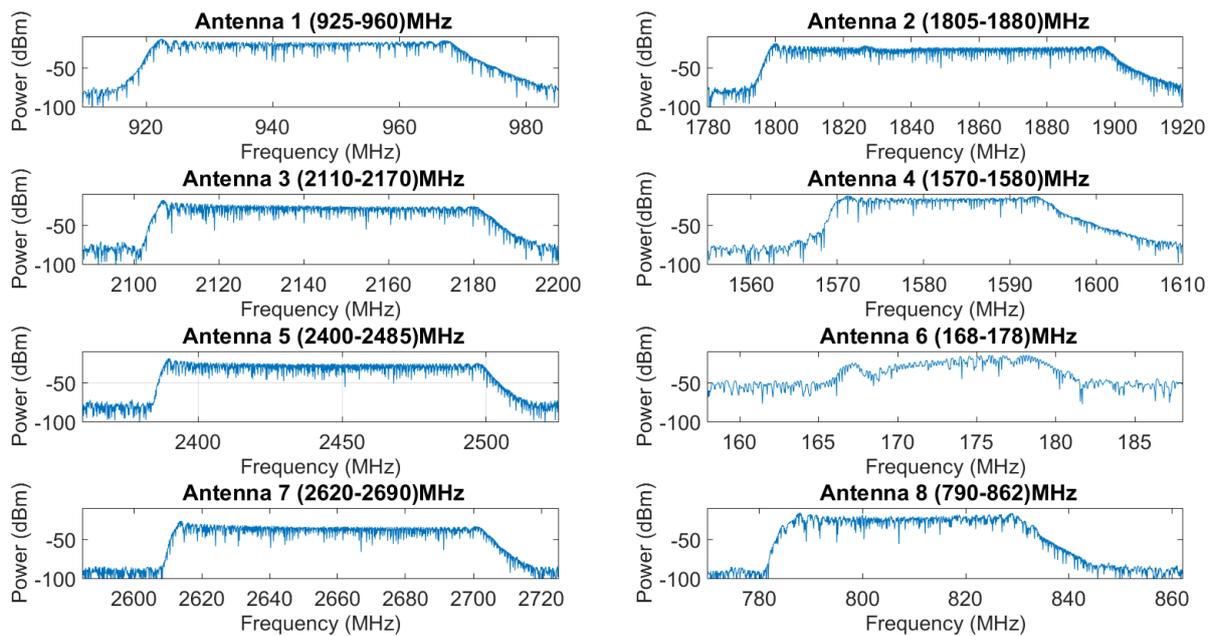


Figure 67 : Spectres des signaux émis sur les 8 ports du brouilleur.

Une transformée temps-fréquences a été appliquée aux mesures réalisées avec l'oscilloscope. Cette représentation permet d'observer la bande couverte par les signaux émis par chacune des antennes ainsi que le temps de balayage de chaque bande.

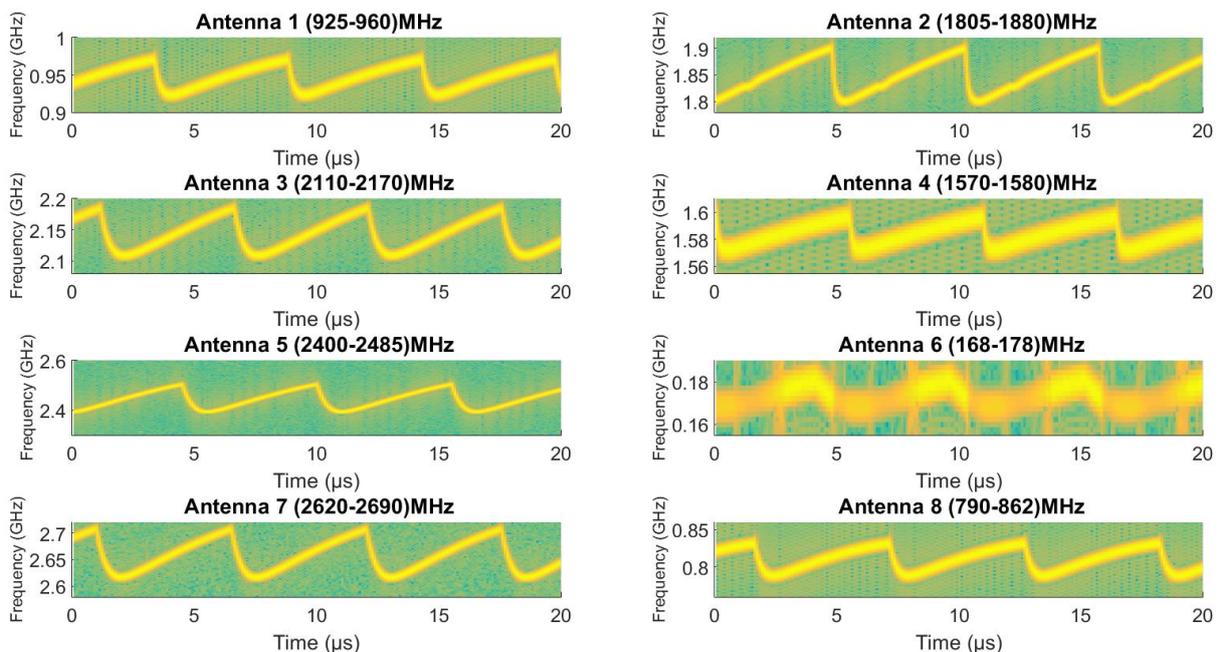


Figure 68 : Représentation temps-fréquences des signaux émis sur les 8 ports du brouilleur.

On constate en particulier que le temps de balayage ne varie pas pour les différentes bandes de fréquence. Dans ce cas, il est de 5.5 μ s. Nous avons observé que ce temps de balayage peut

parfois être différent d'un brouilleur à un autre. Ainsi, pour d'autres brouilleurs, il était d'environ 8.4 μ s.

V.4.2.2. Susceptibilité du GSM-R face aux signaux de brouillage

Dans le cas du GSM-R, nous avons procédé à quelques tests en laboratoire en adaptant le banc de test présenté précédemment dans ce manuscrit. Pour effectuer ces mesures, nous travaillons à une puissance de communication constante de -38 dBm mesurée par l'analyseur de spectre avec une bande de résolution de 120 kHz. La puissance de brouillage est modifiée progressivement par l'usage d'un atténuateur variable et le taux d'erreurs binaire correspondant est mesuré. Le rapport entre le signal de brouillage et le signal de communication est appelé SJR pour « Signal Jamming Ratio ».

Au moment où nous avons mené ces travaux, tous les brouilleurs dont nous disposions présentaient les mêmes temps de balayage de 8.4 μ s. Nous avons donc essentiellement étudié l'effet de la puissance.

Dans le tableau suivant, nous présentons les résultats.

Table 6 : Taux d'erreurs binaire (BER) en fonction du SJR de la communication

P_GSM-R (dBm)	P_JAM (dBm)	SJR (dB)	BER (%)
-38	-36	-2	Communication perdue
-38	-37	-1	12.58
-38	-38	0	5.56
-38	-40	2	2.13
-38	-42	4	0.77
-38	-44	6	0.26
-38	-46	8	0.11
-38	-48	10	0.06
-38	-50	12	0.02

En augmentant progressivement la puissance du signal de brouillage, on constate une augmentation du taux d'erreur. Dès lors que la puissance du signal de brouillage devient comparable à la puissance du signal de communication, on note une forte dégradation, avec un BER de 5.56 % pour un signal de brouillage aussi puissant que le signal de communication. Dès lors que le signal de brouillage excède de 2 dB le signal de communication, la communication est totalement interrompue.

En complément de ce travail, des expérimentations ont également été menées sur des équipements opérationnels dans le cadre du projet SECRET. Pour cela, nous avons testé des communications GSM-R entre un équipement CAB radio (terminal GSM-R situé dans les cabines de conduite des trains) chez la société ALSTOM à Villeurbanne et une station de base GSM-R qui était commandée par la SNCF. La station de base se situait également sur le site

d'ALSTOM. Différents brouilleurs ont été utilisés et nous avons observé la qualité de réception au niveau du CAB radio. Nous avons appliqué différents niveaux d'atténuation à la sortie des brouilleurs pour simuler un brouilleur qui se situerait plus ou moins loin de l'antenne de réception du train. Les niveaux d'atténuation appliqués correspondent à des valeurs de couplage entre l'antenne du brouilleur et l'antenne GSM-R du train pour différentes positions du brouilleur au sein d'un train. Ces valeurs de couplage avaient été mesurées préalablement dans un train à l'arrêt grâce à la collaboration d'Alstom.

Les résultats obtenus n'ont pu être publiés pour des raisons de confidentialité mais ils ont confirmé les résultats obtenus en laboratoire et ont également montré qu'en situation opérationnelle, un brouilleur à bord d'un train pouvait interrompre la liaison entre le train et le sol dès que le train se situait à quelques centaines de mètres de la station de base.

V.4.2.3. Susceptibilité du Wi-Fi face aux signaux de brouillage

Plusieurs standards peuvent être utilisés pour le Wi-Fi. Nos travaux ont porté sur le 802.11 n qui utilise une modulation OFDM.

En débutant nos travaux sur ce thème, nous nous sommes procurés de nouveaux brouilleurs couvrant les fréquences du Wi-Fi. En observant les signaux avec un oscilloscope, nous avons constaté qu'ils présentaient des temps de balayage différents des brouilleurs précédemment caractérisés. En conséquence, nous avons donc décidé d'étudier l'effet de ce paramètre sur la qualité de la liaison Wi-Fi [61]. Ce travail a fait l'objet d'une collaboration avec mon collègue Christophe Gransart et de la thèse de Grecia Romero [60] que j'ai co-encadrée avec Éric Simon.

Dans le cas du Wi-Fi, nous n'avons pas pu travailler en mode conduit car les équipements ne s'y prêtaient pas, vu qu'ils ne possèdent pas de ports de communication accessibles. Nous avons donc mené des expérimentations en chambre anéchoïque, en installant un serveur, un point d'accès et un ordinateur représentant le client. Le logiciel Iperf a été installé sur l'ordinateur client afin de contrôler le débit à la réception. Nous avons émis un signal de brouillage en augmentant progressivement sa puissance et considéré que la communication était totalement interrompue lorsque le débit de la liaison tombait à 0.

Pour étudier l'impact du temps de balayage du signal de brouillage, nous avons défini plusieurs modèles composés avec Matlab puis chargés dans un générateur de signaux arbitraires. Nous avons ainsi appliqué des signaux de brouillage dont le temps pour balayer la bande 2.4 - 2.5 GHz pouvait aller de 0.64 μ s à 50 μ s.

La Figure 69 reporte le rapport de puissance nécessaire entre le signal de brouillage et le signal de communication nécessaire pour interrompre la communication en fonction de la période de balayage du signal de brouillage.

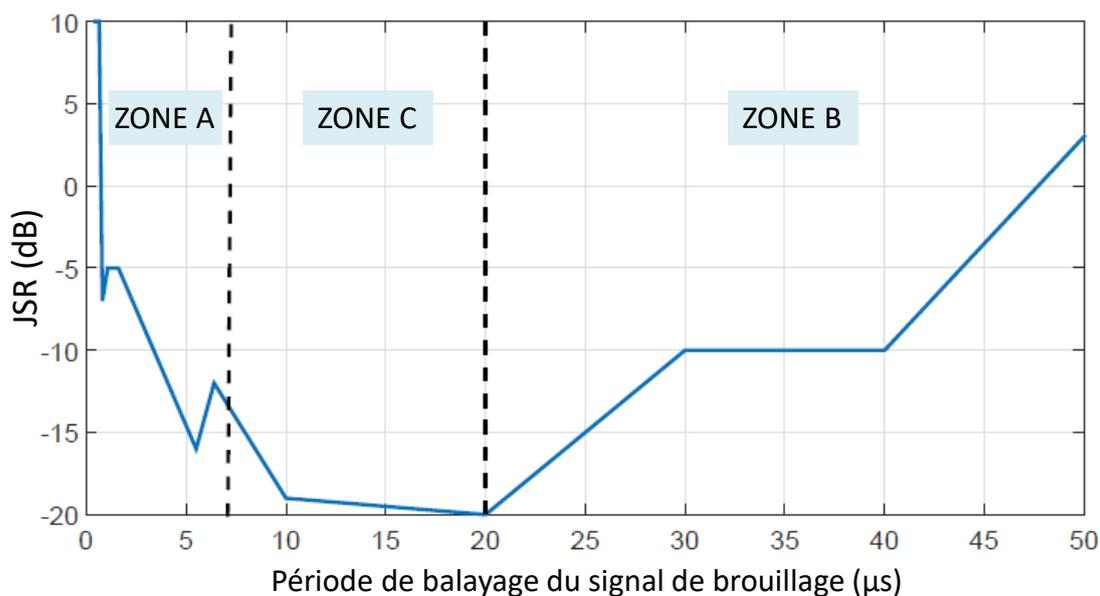


Figure 69 : Rapport de puissance requis entre les signaux de brouillage et de communication nécessaire pour interrompre la communication en fonction de la période de balayage du signal de brouillage.

Ces travaux montrent que l'effet du brouillage varie considérablement selon la période de balayage du signal de brouillage. On constate qu'un balayage très rapide de périodicité égale à $0.64 \mu\text{s}$, situé dans la zone A sur la Figure 69, nécessite une puissance de brouillage de 10 dB supérieure à la puissance du signal de communication pour interrompre la liaison.

En contrepartie, un signal de brouillage de 20 dB inférieur au signal de communication peut interrompre la liaison, dans le cas où la période de balayage est de $20 \mu\text{s}$ (Zone C).

Enfin, dans la zone B, on note que le brouillage devient à nouveau moins efficace lorsque la période de balayage augmente.

Ces résultats ont été expliqués en étudiant le traitement qui est effectué par le récepteur OFDM. En effet, à la réception, le traitement qui est appliqué est une FFT sur des fenêtres de largeur $3.2 \mu\text{s}$. Nous avons donc appliqué une FFT similaire à celle du récepteur OFDM sur les modèles des signaux de brouillage. Ainsi, on constate la distribution en fréquence du signal de brouillage vu au niveau du récepteur selon sa période de balayage.

Pour les périodes de balayage correspondant aux zones A, B et C, les distributions spectrales sur le canal Wi-Fi entre 2.402 et 2.422 GHz, sont données respectivement Figure 70, Figure 71 et Figure 72.

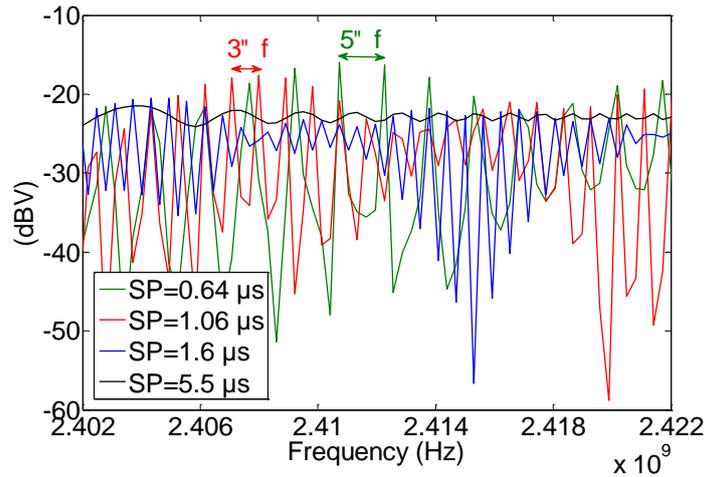


Figure 70 : Spectre du signal de brouillage pour des périodes de balayage (SP pour « sweep period ») allant de 0.64 μs à 5.5 μs .

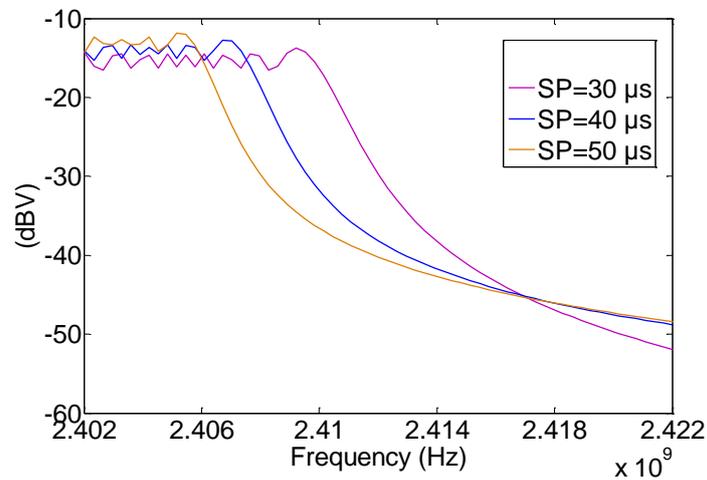


Figure 71 : Spectre du signal de brouillage pour des périodes de balayage (SP pour « sweep period ») allant de 30 μs à 50 μs .

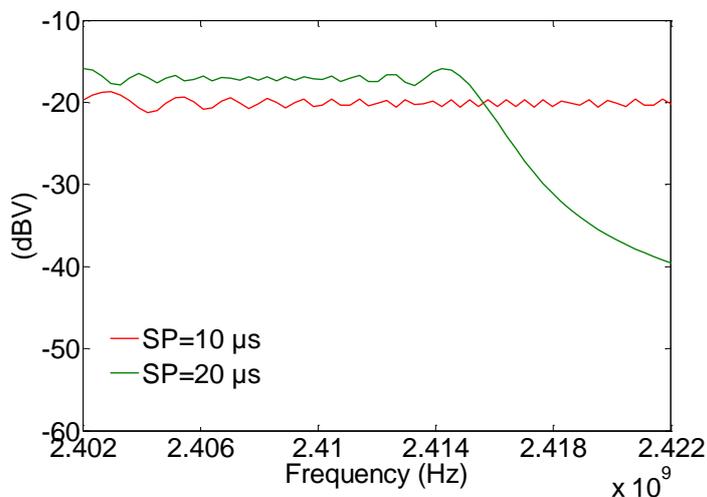


Figure 72 : Spectre du signal de brouillage pour des périodes de balayage (SP pour « sweep period ») allant de 10 μs et 20 μs .

On constate que pour un balayage très rapide, la distribution spectrale comporte des raies de fréquences qui sont d'autant plus espacées que la période de balayage est rapide. Ainsi, dans le cas d'un balayage très rapide de $0.64 \mu\text{s}$, 1 sous porteuse sur cinq est susceptible d'être affectée. Ceci explique l'inefficacité du brouillage dans ces conditions.

Un balayage plus « lent », entre $30 \mu\text{s}$ et $50 \mu\text{s}$, entraîne une couverture nécessairement partielle du canal Wi-Fi. La couverture peut même être totalement nulle si à l'instant de réception, le signal de brouillage se trouve sur les autres canaux. Ainsi, même dans le pire des cas, il apparaît qu'une partie des sous porteuses ne sera pas affectée. Plus le balayage est lent, plus le nombre de sous porteuses susceptibles d'être affectées s'avère faible.

Pour les balayages de périodicité de 10 et $20 \mu\text{s}$, sachant que les sous-porteuses du canal réellement utilisées s'étendent sur 16 MHz , on note que les deux périodes de balayage permettent de couvrir de manière significative le canal.

Enfin, pour compléter l'analyse, nous nous sommes également intéressés au mode d'accès au canal. En effet, avant d'accéder au canal, un client sonde régulièrement le canal pour s'assurer que la ressource n'est pas déjà occupée. Il s'agit de l'algorithme CCA pour « Clear Channel Assessment » qui correspond à une mesure de la puissance sur le canal et la compare à un seuil. Si la valeur excède le seuil, le canal est considéré comme occupé.

L'algorithme exact d'obtention de la puissance n'est pas détaillé dans le standard du 802.11n [61]. La définition indique qu'il s'agit du maximum de la puissance moyenne, mesurée sur une période de $28 \mu\text{s}$ ² et que le dépassement du seuil doit être observé dans un délai inférieur à $4 \mu\text{s}$.

Nous avons donc calculé cette puissance pour les différents cas de brouillage en découpant la période de $28 \mu\text{s}$ en 7 fenêtres de $4 \mu\text{s}$, qui correspond à la durée d'un symbole plus $0.8 \mu\text{s}$ de temps de garde. Nous avons calculé la puissance moyenne sur chaque fenêtre de $4 \mu\text{s}$ et conservé la puissance maximale parmi les 7 fenêtres.

Le principe de calcul et le résultat de la puissance pour les différentes périodes de balayage sont reportés Figure 73 et Figure 74 .

² Cette période de $28 \mu\text{s}$ correspond à la période DIFS pour « Distributed Inter Frame Space ».

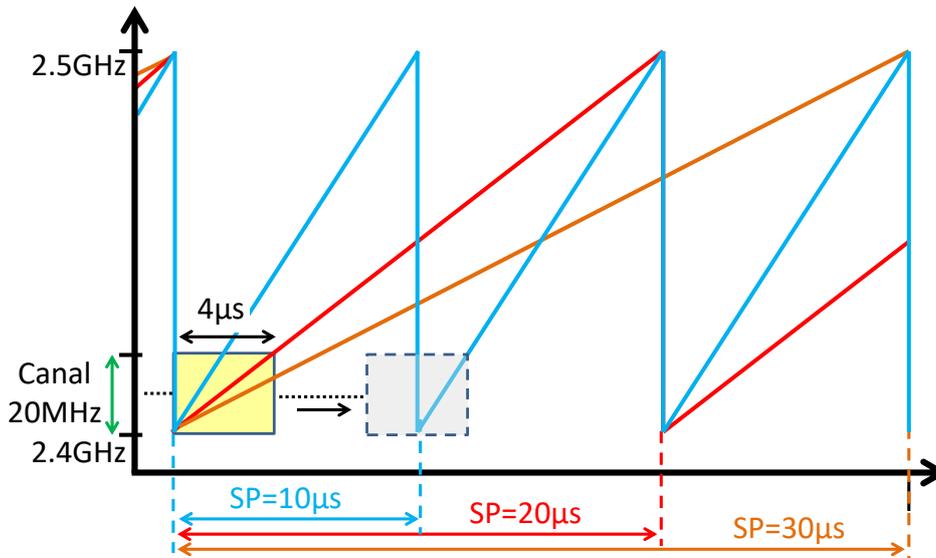


Figure 73 : Illustration du principe de calcul de la puissance par le CCA

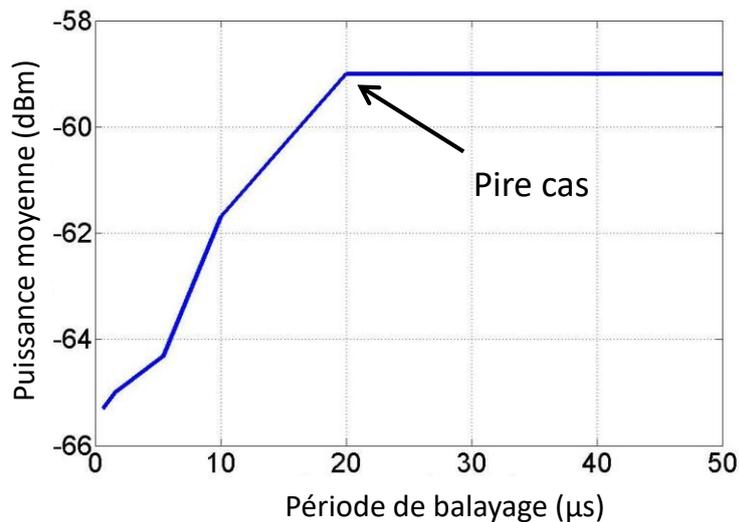


Figure 74 : Valeur maximale sur 28 μ s de la puissance moyenne sur 4 μ s.

Ce résultat montre que si le temps de balayage est supérieur à 20 μ s, le brouillage est présent sur toute la durée de la fenêtre de 4 μ s, et l'algorithme CCA atteint une valeur maximale de la puissance. Ainsi, le balayage d'une durée de 20 μ s constitue le plus rapide permettant d'atteindre cette valeur maximale et donc d'entraîner un dépassement du seuil qui conduit à considérer le canal occupé.

V.4.3. La détection des signaux d'interférences EM intentionnelles

Les études que j'ai menées et encadrées pour étudier la vulnérabilité des systèmes de communication face aux interférences EM visent principalement à identifier des moyens de rendre résilientes les solutions de communication.

Cependant, une première nécessité est d'être capable de détecter ces interférences EM

intentionnelles. En effet, l'attaque par brouillage constitue un moyen très furtif de mettre un défaut un système. En particulier, dans le cas du train et du GSM-R, une personne mal intentionnée peut activer un brouilleur, entraînant un freinage automatique du train, puis éteindre son brouilleur et ne laisser aucune trace de cette agression EM. En effet, ces dispositifs ne produisent pas de défauts permanents permettant de remonter à l'origine. De ce fait, il serait certainement très difficile de conclure fermement à une attaque face à une probable défaillance technique.

Ainsi, la détection ne peut être faite qu'au moment où le dispositif de brouillage est en action. Il faut donc envisager des modes de surveillance permanents de l'activité électromagnétique pour détecter la présence de signaux illicites et critiques.

V.4.3.1. Détection de signaux de brouillage du GSM-R

Ces premiers travaux sur la détection des signaux de brouillage à l'encontre des communications GSM-R ont été menés dans le cadre du projet européen SECRET et de la thèse de Souhir Mili.

Dans ce contexte, plusieurs approches ont été étudiées parallèlement afin d'aboutir à une vision assez large des approches possibles, de leurs performances respectives et de leur intérêt selon les espaces du réseau ferroviaire à surveiller (voies ferrées, gare ou à bord des trains).

Une première approche consiste à procéder à des acquisitions spectrales sur la bande de fréquence surveillée, puis à définir un gabarit au tour du spectre collecté. Ce gabarit devient alors l'élément de référence. Ensuite, en procédant à une surveillance continue, on contrôle le nombre de canaux qui excèdent le gabarit. En adoptant, une configuration de mesure optimale en termes de bande de résolution, de nombre de canaux... cette méthode peut s'avérer efficace dès lors que le SJR est inférieur ou égale à 3 dB. Pour que cette méthode soit efficace, il faut par ailleurs que le spectre en situation normale soit relativement constant et peu chargé. Cette méthode peut par exemple, présenter un intérêt pour une surveillance au niveau d'une station de base qui serait située en campagne, ou l'activité spectrale varie peu.

En revanche, pour des lieux avec une activité spectrale riche et rapidement évolutive, en situation de mobilité par exemple, elle est peu envisageable. Ainsi, nous avons également travaillé sur deux autres approches. La première se base toujours sur l'analyse spectrale des signaux reçus une antenne de surveillance mais en établissant des modèles statistiques et une probabilité d'appartenance à ces modèles. La seconde exploite les données I et Q reçu par le récepteur de télécommunication et les déformations de la constellation I et Q en présence de brouillage.

- Par analyse spectrale et modèle statistique

La première méthode s'appuie sur la distribution des signaux de communication ou de brouillage dans l'espace des fréquences. Il s'agit de développer un système de détection d'attaque par reconnaissance de forme. Cette méthode exploite les informations apparaissant au niveau d'une antenne de surveillance et acquises par l'intermédiaire d'un équipement de

mesure associé. Elle a pour but d'observer le contenu spectral pour la détection de signaux perturbateurs en utilisant comme descripteur la densité spectrale de puissance (d.s.p). Cette approche se fonde sur les méthodes de classification supervisées utilisant des informations a priori concernant l'environnement à étudier. Cela signifie que l'on doit disposer de données spectrales de l'environnement dit « normal » et également de données spectrales de l'environnement dit « attaqué », éventuellement en présence de divers brouilleurs, si l'on veut également pouvoir identifier le type de brouilleur. L'objectif qui consiste à effectuer la détection par classification, revient à reconnaître un état parmi d'autres au sein du flux de données observé.

La mise en œuvre d'un tel procédé peut se réaliser en estimant des modèles statistiques pour chaque état de l'environnement : état non brouillé, état brouillé avec brouilleur 1, état brouillé avec brouilleur 2... La décision finale est obtenue en comparant les probabilités d'appartenir aux différents modèles.

La méthode nécessite donc de mesurer de la d.s.p S dans des situations normales ou attaquées, et de les modéliser par une fonction de densité probabiliste (pdf).

Cette approche exploite un mode supervisé qui implique une phase d'apprentissage pour la définition des modèles. Pour cet apprentissage, nous avons procédé à des acquisitions à partir du banc de mesures schématisé par la Figure 75.

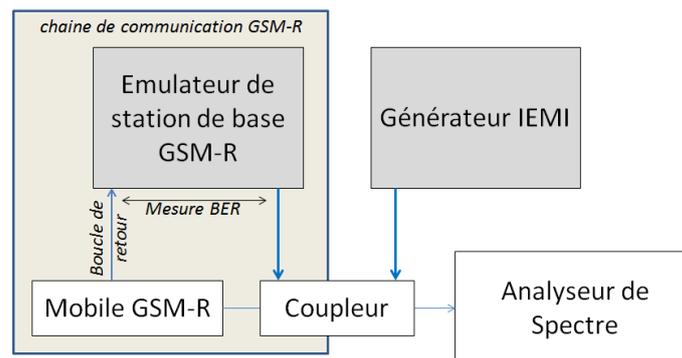
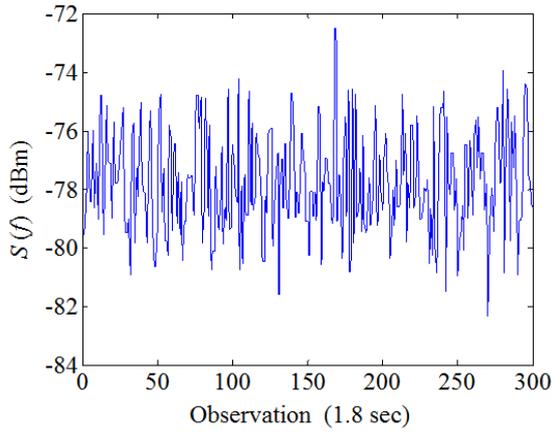


Figure 75 : Banc de mesures GSM-R

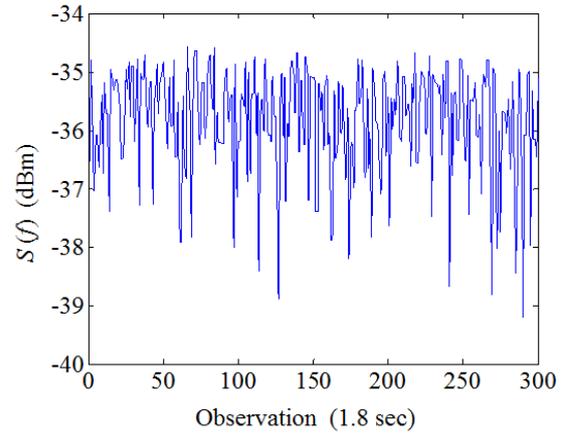
La méthode s'appuie sur la densité spectrale de puissance des signaux récupérée via l'analyseur de spectre. L'apprentissage a été mené à partir des différents brouilleurs disponibles. Le modèle prend ainsi en considération la communication avec différents signaux de brouillage potentiels.

L'étude consiste à modéliser la d.s.p de chaque fréquence du spectre surveillée en fonction de sa pdf suivant un modèle gaussien.

Cependant, en étudiant les d.s.p des différentes fréquences, on constate qu'elles ne suivent pas toute une distribution gaussienne. Certaines s'apparentent à une distribution de log Rayleigh.

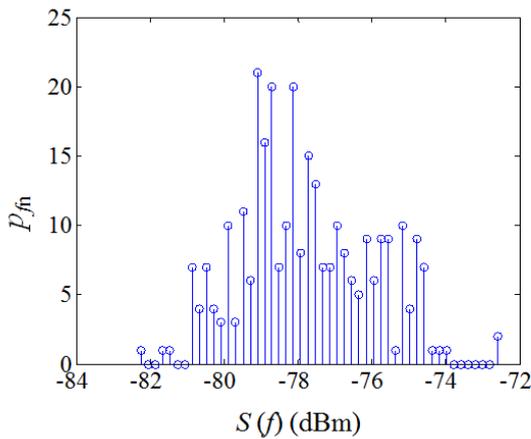


(a)

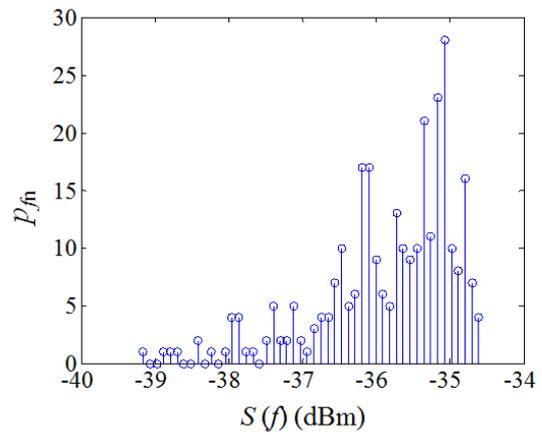


(b)

Figure 76 : Evolution temporelle de la dsp S de deux fréquences. (a) : $S(f = 912 \text{ MHz})$, (b) : $S(f = 924.8 \text{ MHz})$



(a)



(b)

Figure 77 : Histogrammes des 300 observations consécutives pour (a) : $S(f=912 \text{ MHz})$, b : $S(f = 924.8 \text{ MHz})$

Face aux différentes observations, le choix a été de modéliser chaque canal spectral par une distribution de loi multi-gaussienne. Celle-ci, composée d'une somme de noyaux gaussiens pondérés permet, en fonction de l'estimation des noyaux et de leur poids, de s'adapter aux caractéristiques particulières de chaque canal spectral.

La définition de la distribution statistique $p_{Sf}()$ dans ce contexte s'exprime par :

$$p_{S_f}(S(f)) = \sum_{g=1}^G p_g \mathcal{N}_g(S(f); \mu_{f(g)}, \sigma_{f(g)}) \quad \text{V-3-24}$$

Où G désigne le nombre de noyaux gaussiens composant le mélange, \mathcal{N}_g le noyau gaussien d'indice g suivant une loi normale de paramètre moyenne $\mu_{f(g)}$ et variance $\sigma_{f(g)}$ et p_g le poids associé à chaque noyau gaussien \mathcal{N}_g sachant que :

$$\forall g, p_g > 0 \text{ et } \sum_{g=1}^G p_g = 1$$

V-3-25

La Figure 78 illustre une distribution engendrée par une loi multi-gaussienne.

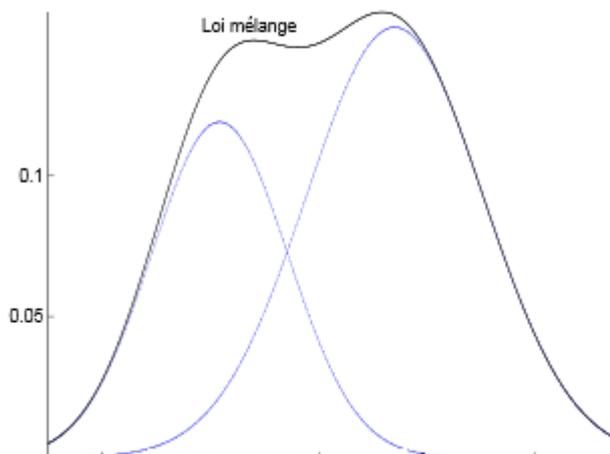


Figure 78 : Mélanges multi-gaussiens (2 gaussiennes)

La phase de détection est réalisée par classification. La classification consiste à reconnaître à travers un flux d'observations des « motifs », des « formes » pouvant correspondre à des situations « labellisées » et connues (méthode supervisée).

Dans notre cas, les classes sont les différents états pris par les d.s.p, avec et sans brouilleur et éventuellement pour différents brouilleurs. Ainsi, la détection de brouillage et l'identification du type de brouilleur s'effectuent conjointement en identifiant la classe d'appartenance de la d.s.p observée par probabilité.

Des acquisitions ont donc été réalisées sans brouilleur et en présence de différents brouilleurs pour définir des modèles et construire des bases de test qui servent à évaluer nos modèles. Pour la base d'apprentissage, 3 brouilleurs ont été utilisés et nous avons fait varier la puissance du signal de communication. Les acquisitions ont été réalisées entre 850 MHz et 1 GHz. Nous avons utilisé cette première base pour estimer les différents paramètres du modèle statistique. Nous avons estimé les paramètres (la moyenne μ_{fn} et la variance σ_{fn}) du modèle multi-gaussien pour chaque situation (brouillée ou non brouillée), pour chacune des fréquences du spectre étudié et dans le cas de modèles utilisant un mélange d'une à quatre gaussiennes.

Cette méthode a montré qu'elle permet de détecter des signaux de brouillage de puissance plus faibles que la méthode précédente. De plus, bien qu'elle nécessite un apprentissage qui peut sembler un peu lourd, elle apparaît la plus adaptée pour envisager de la détection dans des lieux où l'usage du spectre varie considérablement au cours du temps.

- Détection par analyse de l'EVM

Cette méthode de détection d'attaque EM exploite directement l'estimation des signaux en bande de base. Nous étudions les signaux en phase et en quadrature, $I(t)$ et $Q(t)$, obtenus

après le filtrage passe-bas de la chaîne de démodulation d'un récepteur GSM/GSM-R selon le schéma de la Figure 79.

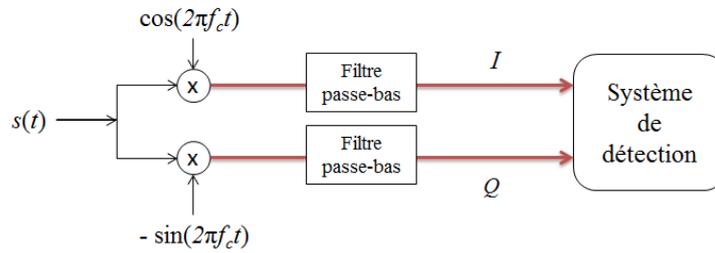


Figure 79 : Système de détection quadratique.

Pour illustrer l'effet d'un signal de brouillage sur les données IQ, les figures suivantes représentent les constellations IQ des signaux sans brouillage (en vert) et avec brouillage (en noir), pour des signaux de brouillage plus ou moins puissants.

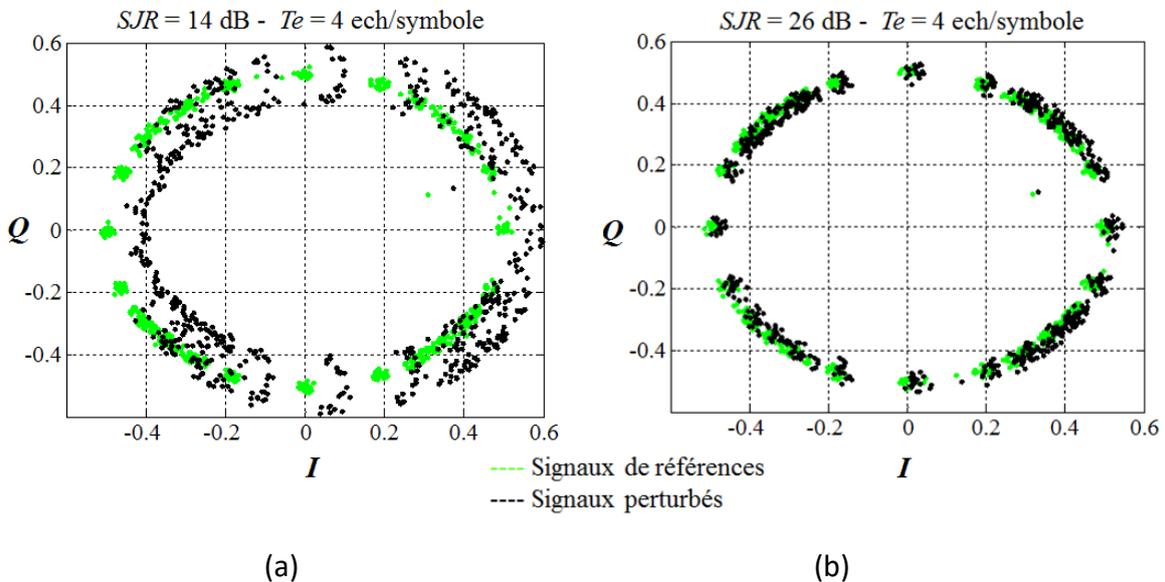


Figure 80 : Constellations des signaux en quadrature $I(nT_e)$ et $Q(nT_e)$ avec et sans brouillage.
(a) : $SJR = 14$ dB (b) : $SJR = 26$ dB

Un paramètre qui permet de mesurer la déformation de la constellation est l'*EVM*. Il s'agit d'un paramètre couramment utilisé dans les systèmes de communication modernes pour évaluer la qualité de modulation [65].

Le vecteur d'erreur de magnitude mesure la variation entre la forme d'onde de référence et la forme d'onde mesurée. L'*EVM* est la différence vectorielle entre les positions d'un symbole du signal de référence et d'un symbole du signal reçu, tel que le montre la Figure 81. Finalement, l'*EVM* représente la différence de position entre la représentation quadratique avant canal et après canal de transmission [65].

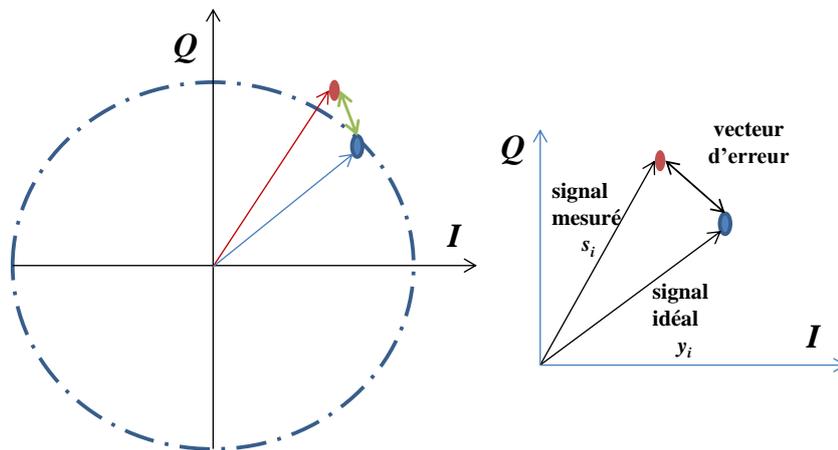


Figure 81 : Constellations IQ et représentation de l'EVM

L'expression de l'EVM est décrite comme suit :

$$EVM = |s_n - y_n| \text{ avec } \begin{cases} \|y_n\| = \sqrt{i^2(nT_e) + q^2(nT_e)} \\ \|s_n\| = \sqrt{I^2(nT_e) + Q^2(nT_e)} \end{cases} \quad \text{V-3-26}$$

où y_n et s_n représentent respectivement le vecteur défini par les composantes $i(nT_e)$ et $q(nT_e)$ pour le signal avant canal et le vecteur défini par les composantes $I(nT_e)$ et $Q(nT_e)$ pour le signal estimé après passage par le canal.

Afin de caractériser les propriétés de cette erreur vis-à-vis du signal de référence, on définit l' EVM_{rms} . Cette dernière correspond à la variance normalisée de l'erreur et est estimée sur une durée temporelle équivalente à la durée d'un « burst » de 157 symboles pour le GSM-R :

$$EVM_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_n |s_n - y_n|^2}{\sum_n |y_n|^2}} \quad \text{V-3-27}$$

Pour mettre en œuvre la détection en utilisant ce paramètre, des données ont été acquises pour la phase d'apprentissage. Elles permettent de fixer les valeurs seuil indispensables à la détection. Des données ont d'abord été collectées sans brouillage afin de fixer le seuil. L'exercice a été réalisé avec des données obtenues par simulation sous Matlab puis expérimentalement. L'expression du seuil calculé à partir des données sans brouillage est donnée par l'équation V-3-28.

$$EVM_{seuil} = \mu_{EVM} + 3 \cdot \sigma_{EVM} \quad \text{V-3-28}$$

Plusieurs bases de test ont ensuite été construites à partir de données de simulation et de mesure et en présence de différents signaux de brouillage. La détection consiste ensuite à calculer l' EVM_{RMS} et à le comparer au seuil défini avec les bases d'apprentissage. Le tableau suivant présente les résultats de détection pour les deux bases de test expérimentales.

Table 7 : Taux de détection pour les bases de test 1 et 2

Base de données	Détection	Absence de détection
Base 1	73.3 %	26.7 %
Base 2	88.9 %	11.1 %

Ces résultats montrent une part importante de non détection. Sachant que cette détection est basée sur l'EVM calculé sur 1 burst de données, nous avons donc mené une étude complémentaire pour vérifier si la détection pouvait être améliorée en considérant plusieurs bursts successifs. Nous avons observé qu'en considérant 5 bursts successifs, la détection pouvait atteindre 100% sur les bases de test.

Nous avons ensuite procédé à des tests en nous plaçant le long d'une ligne ferroviaire de façon à introduire les perturbations produites par la ligne et les passages de trains.

Le pourcentage de bonne détection et de non-détection, sur l'analyse d'un seul burst, est présenté 0. Nous travaillons dans un premier temps comme précédemment.

Table 8 : Taux de détection des perturbations sur 1 burst

Mode	Détection	Absence de détection
Perturbé	85.7 %	14.3 %
Mode	Détection	Fausses alarmes
Non perturbé	97.6 %	2.4 %

Nous observons un taux de détection imparfait et également un taux de fausse alarme significatif. La Figure 82 illustre certaines valeurs prises par l'EVM durant la période d'observation dans deux situations avec et sans présence de brouillage.

La ligne horizontale qui apparaît sur les deux figures représente le seuil délimitant le fonctionnement normal.

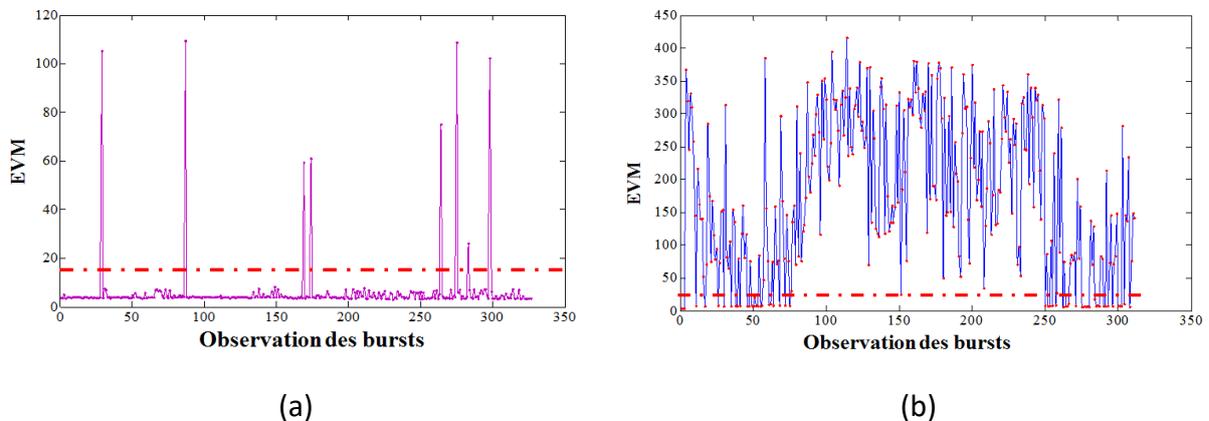


Figure 82 : Observation des EVM par burst de communication, (a) : sans brouillage, (b) : avec brouillage.

Que ce soit avec ou sans brouillage, les valeurs d' EVM_{rms} ne respectent pas toutes le modèle.

En absence de brouillage, certaines valeurs excèdent le seuil sélectionné et en présence de brouillage, certaines sont inférieures au seuil.

Cependant, en l'absence de brouillage, nous constatons que les valeurs qui excèdent sont très isolées. Elles peuvent être dues à la présence de perturbations transitoires très brèves produites au passage des trains par le contact caténaire-pantographe. Ainsi, une façon de contourner ces fausses détections, est de considérer l'EVM sur plusieurs bursts successifs. Cela permet également d'améliorer le taux de détection.

Les paragraphes qui précèdent donnent un aperçu des techniques de détection que nous avons explorées et évaluées. Nous avons également mis en œuvre des démonstrations en testant parallèlement les différentes techniques et en faisant varier le SJR. Ainsi, nous avons constaté que la technique qui se base sur un gabarit de référence est applicable pour un SJR inférieur ou égal à 3 dB, la méthode qui emploie un modèle multi gaussien est efficace jusqu'à un SJR de 7 dB tandis que la méthode qui emploie l'EVM est efficace jusqu'à un SJR de 20 dB. Cette dernière méthode est donc la plus sensible en terme de capacité de détection de brouillages de faible puissance. En revanche, elle s'appuie sur les données à la réception et nécessite que la synchronisation ne soit pas perdue. Elle ne peut donc permettre de détecter un signal de brouillage, que tant qu'il n'interrompt pas la communication.

V.4.3.2. Détection de signaux de brouillage du Wi-Fi

Les travaux sur le Wi-Fi et le GSM-R ont montré que la sensibilité des deux systèmes au brouillage peut être très différente. Alors que le GSM-R est sensible à un signal de brouillage d'une puissance comparable, les communications Wi-Fi peuvent être interrompues par un signal de brouillage d'une puissance de 20 dB inférieure à la puissance du signal de communication.

Une mesure sur une antenne située à proximité du client et à l'aide d'un analyseur temps-réel permet de montrer la sensibilité du signal Wi-Fi au signal de brouillage. Pour cette mesure, nous avons ajusté la puissance du signal de brouillage pour être en limite de coupure de la communication. Nous avons effectué l'acquisition temps-fréquences avec une puissance du signal de brouillage 1 dB en dessous la puissance nécessaire pour totalement interrompre la communication. La mesure a été effectuée à proximité du client pour observer le signal presque tel que le client le reçoit.

Le signal de brouillage appliqué balaie la bande de fréquence de 2.4 GHz à 2.5 GHz en 10 μ s. Il s'agit donc d'un cas de balayage efficace. La représentation temps-fréquences du signal mesuré à proximité du client est donnée Figure 83.

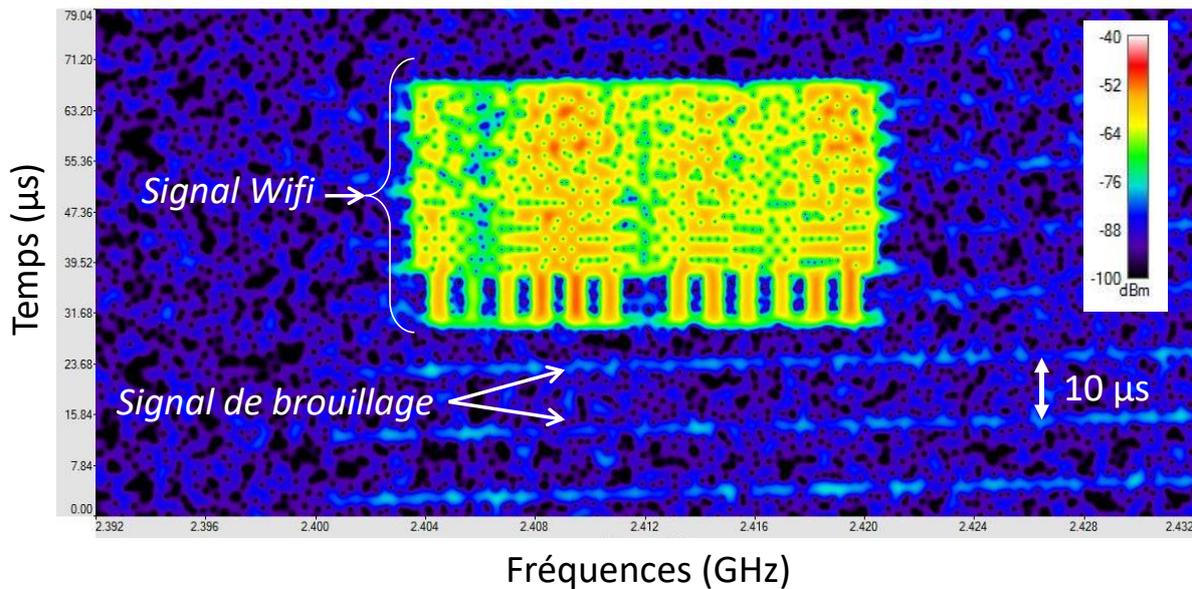


Figure 83 : Représentation temps-fréquences du signal mesuré à proximité du client pour un signal de brouillage de 1 dB inférieur à la puissance entraînant la coupure de communication.

Cette représentation illustre la différence de puissance entre le signal de communication et le signal de brouillage. En observant cette représentation, on constate la difficulté à détecter un signal de puissance aussi faible dans un canal occupé.

Nous avons donc exploité l'outil développé par Raouf Kousri dans le cadre de sa thèse, pour concevoir un traitement à la réception qui mette en valeur le signal de brouillage et atténue le signal de communication, ceci afin de faciliter sa détection. Ce travail a également été effectué par Raouf Kousri au cours d'un contrat post-doctoral, que j'ai encadré.

Pour optimiser la détection, nous avons fait le choix de nous focaliser sur les sous porteuses de garde. En effet, le canal de 20 MHz comporte 64 sous-porteuses, mais seulement 52 sous porteuses comportent de la donnée. La différence entre les puissances recueillies sur les sous-porteuses de garde et les sous-porteuses utilisées est illustrée Figure 84.

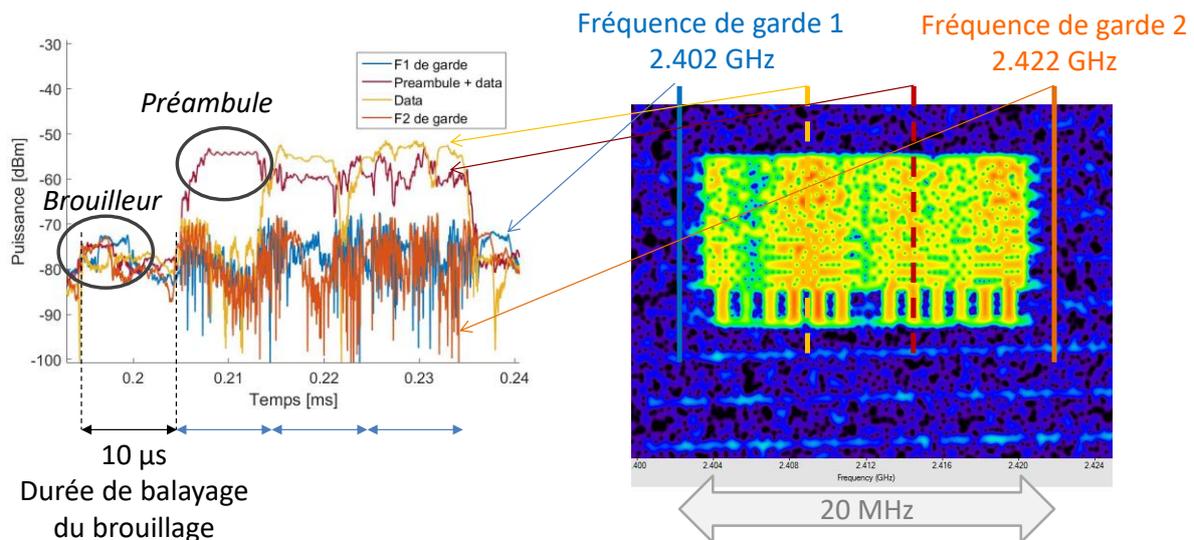


Figure 84 : Représentation de la puissance du signal au cours du temps sur 4 sous-porteuses : sous-porteuses de garde aux deux extrémités du canal et 2 sous-porteuses transportant des données.

Sur la partie gauche de cette figure, on relève la puissance au cours du temps sur quatre sous-porteuses : deux sous-porteuses de garde et deux sous-porteuses transportant des données. Les puissances sont obtenues en appliquant un traitement similaire à celui appliqué par le récepteur Wi-Fi, à savoir une FFT sur une fenêtre de $3.2 \mu\text{s}$. On note que le passage du signal de brouillage sur les sous-porteuses de garde est uniquement discernable dans les premiers instants de l'acquisition, à savoir au moment où il n'y a pas de données transportées sur les autres canaux. En effet, sur le reste du temps de mesure, la puissance sur les sous-porteuses de garde est impactée par la présence de données sur les autres sous-porteuses utilisées. Ainsi, bien que le signal de brouillage passe toutes les $10 \mu\text{s}$ sur les sous-porteuses de garde, la signature de son passage n'est pas détectable.

Dès lors, effectuer la détection en surveillant les sous-porteuses de garde n'est pas suffisant. Il faut également adopter un traitement à la réception qui atténue l'impact des autres sous-porteuses et amplifie le signal émanant du brouilleur lors de son passage sur la sous-porteuse.

Ceci peut être réalisé en utilisant l'outil d'analyse temps-fréquences présenté page 73. Nous pouvons ainsi limiter l'étude à une ou deux fréquences d'intérêt pour n'étudier que les sous-porteuses de garde. De plus, il offre suffisamment de souplesse pour adopter des résolutions en fréquence et en temps optimales.

Pour détecter le passage du signal de brouillage sur le canal de sous-porteuse, il faut amplifier la puissance reçue et pour cela, réduire la fenêtre de temps pour que sa durée soit comparable au temps de passage du signal sur la sous-porteuse. Parallèlement, pour réduire l'impact des signaux présents sur les autres sous-porteuses, il faut améliorer la résolution en fréquence. Ainsi, nous avons adopté une fenêtre de $0.53 \mu\text{s}$ qui permet d'atténuer au maximum le signal résiduel de la plus proche sous-porteuse utilisée sur le canal. On constate sur la figure suivante que la réponse de la fenêtre rectangle de $0.53 \mu\text{s}$ avec 3 convolutions, comporte un minima à la fréquence de la dernière sous-porteuse utilisée.

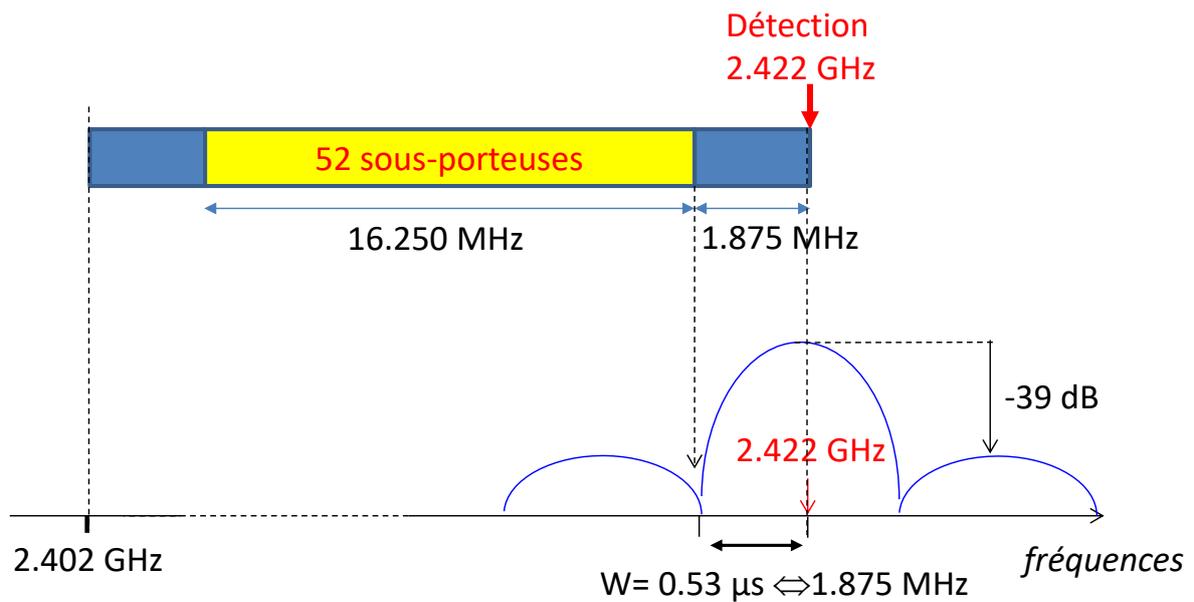


Figure 85 : Principe d'optimisation de résolution en fréquence pour la détection du signal de brouillage.

La figure suivante présente la puissance recueillie au cours du temps sur les deux sous-porteuses de garde en adoptant les principes décrits précédemment. On constate que les passages du signal de brouillage toutes les 10 μ s deviennent désormais bien visibles.

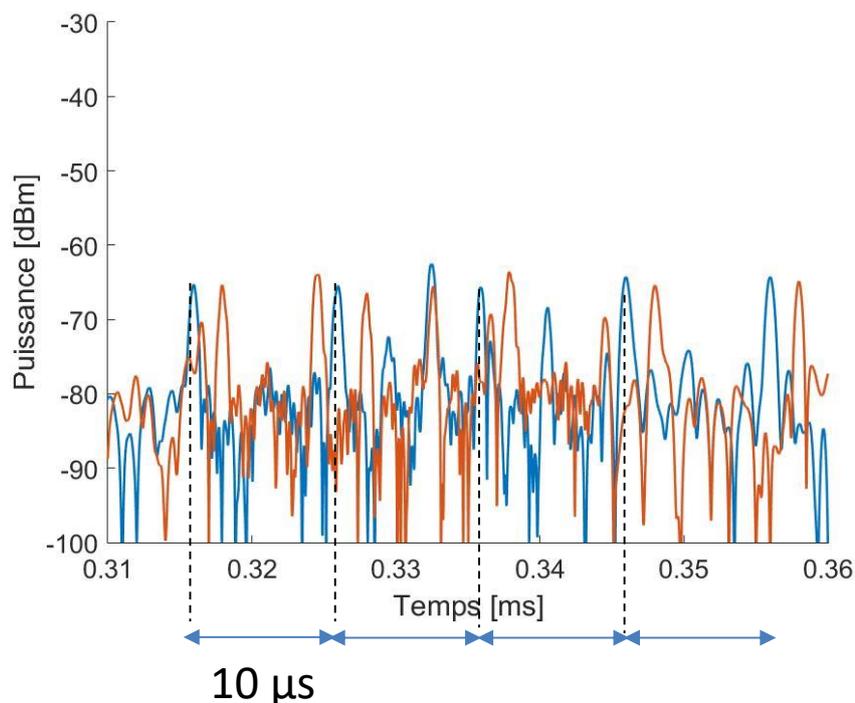


Figure 86 : Représentation de la puissance du signal sur les 2 sous-porteuses de garde, au cours du temps, en adoptant une fenêtre rectangle de 0.53 μ s et 3 convolutions.

La figure suivante compare les résultats obtenus pour toutes les sous porteuses sur une durée

de 1 ms en adoptant un traitement similaire au récepteur Wi-Fi à gauche, et en adoptant un traitement pour la détection du brouillage.

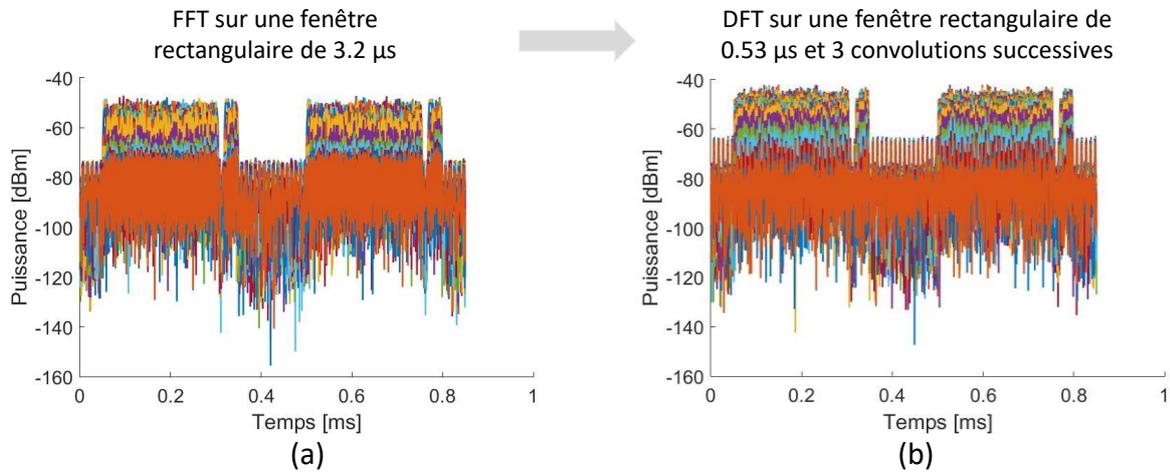


Figure 87 : Représentation de la puissance du signal au cours du temps sur toutes les sous-porteuses du canal : (a) en effectuant une FFT sur une fenêtre rectangle de 3.2 μs, (b) en procédant à une DFT avec une fenêtre rectangle de 0.53 μs et 3 convolutions.

Ensuite, les techniques de détection mises en œuvre peuvent être multiples. Nous pouvons, par exemple, définir un seuil et détecter les maxima qui excèdent ce seuil sur les fréquences de garde. C'est ce qui a été employé dans le résultat présenté Figure 88. On relève les maxima et si les intervalles de temps entre maxima s'avèrent être quasi constants, alors la détection est positive.

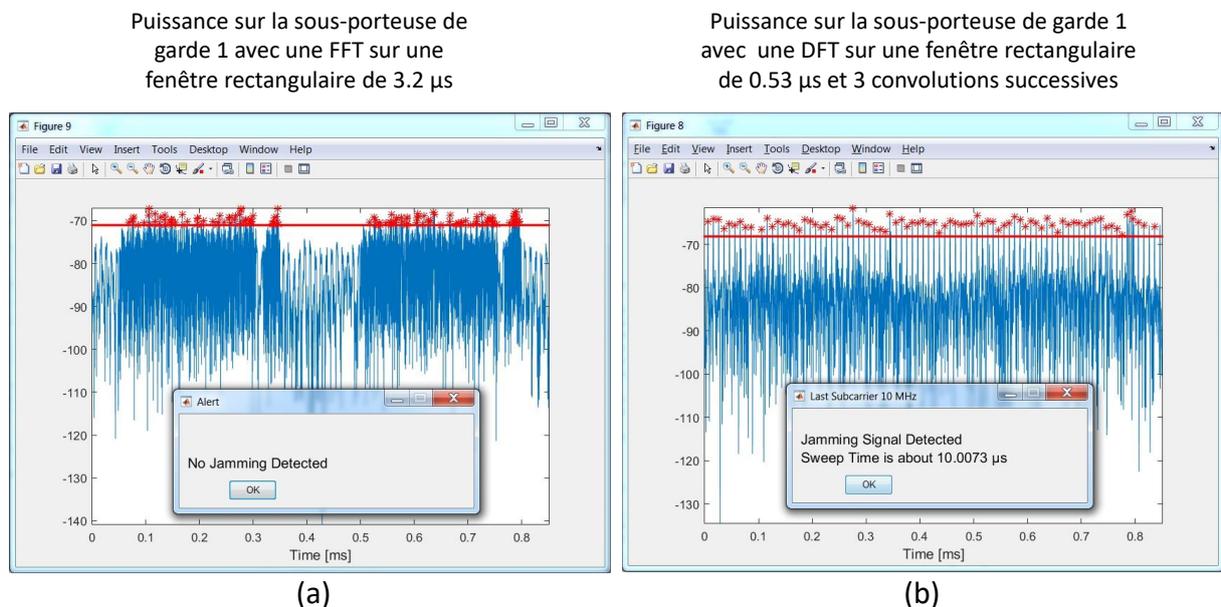


Figure 88 : Résultat d'un algorithme de détection de maxima et d'intervalles entre maxima : (a) sur la puissance de la sous-porteuse de garde obtenue par un traitement similaire au récepteur Wi-Fi, (b) sur la puissance de la sous-porteuse de garde obtenue avec une DFT avec une fenêtre rectangle de 0.53 μs et 3 convolutions.

Sur cette figure, on constate que lorsque l'algorithme est appliqué sur des données issues d'un traitement similaire au récepteur Wi-Fi, le signal de brouillage n'est pas détecté. En revanche, lorsque l'algorithme est appliqué sur des données issues d'un traitement amplifiant le signal de brouillage et filtrant la puissance résiduelle des sous-porteuses utilisées, la détection est positive.

D'autres approches de détection ont également été envisagées, tel qu'une approche fondée sur l'autocorrélation du signal. De la même façon que précédemment, il apparaît qu'il faut procéder préalablement à un traitement temps-fréquences configuré pour mettre en évidence au mieux la présence du brouillage dans le signal analysé. Ces travaux sont récents et les résultats viennent d'être soumis pour publication.

Plus généralement, ces travaux sur les interférences EM intentionnelles s'inscrivent aujourd'hui dans le thème de la cyber sécurité des systèmes de communication sans fils. Ces travaux nous conduisent à aborder d'autres types de cyber attaques avec la collaboration de plusieurs collègues de l'Institut Mines-Télécom et de l'IEMN. Nous avons notamment commencé à travailler sur des attaques protocolaires telles que celles qui consistent à envoyer des ordres de de-authentication ou encore les attaques par création de faux points d'accès qui permettent d'intercepter les échanges. Nous cherchons ainsi à mener des analyses de l'activité électromagnétique pour reconnaître la présence de ces attaques au niveau de la couche physique [66]. Ce dernier point sera repris dans les perspectives du chapitre suivant.

VI. Perspectives

Mes perspectives en matière de travaux de recherche restent fidèles aux trois principaux thèmes qui composent ce manuscrit.

Concernant le thème des méthodes et moyens d'essais électromagnétiques, il me semble aujourd'hui plus difficile de trouver des opportunités de faire financer des recherches collaboratives dans ces thèmes. En effet, les industriels impliqués dans ces thèmes étant assez peu nombreux, il est difficile de former des consortiums pour monter des projets collaboratifs. Cependant, je pense qu'il reste pertinent de poursuivre des travaux sur l'utilisation des signaux impulsionnels en chambres réverbérantes à brassage de modes. En effet, d'une part les chambres réverbérantes constituent des équipements qui présentent toujours plus d'intérêt dans le domaine de la CEM mais également dans le domaine des télécommunications, puisqu'elles permettent d'émuler des conditions particulières. En outre, l'évolution des équipements de génération de signaux arbitraires et de mesures dans le domaine des temps, permet de viser de nouveaux objectifs ambitieux. Ce thème devrait me permettre de développer de nouvelles collaborations académiques. Il devrait également être un thème opportun pour mettre en œuvre des collaborations avec le laboratoire ESYCOM dans le cadre de l'intégration de l'IFSTTAR à la future université cible à naître en 2020. Des discussions informelles ont déjà eu lieu pour construire une collaboration à partir des outils financiers incitatifs proposés pour la construction de cette future université.

En ce qui concerne le thème de la caractérisation des environnements EM transport, il faut garder à l'esprit que les configurations choisies et les méthodes d'analyse pour la caractérisation dépendent des caractéristiques des systèmes ou équipements à protéger. Les caractérisations qui sont réalisées visent généralement à étudier la robustesse d'un équipement ou d'un système face à l'environnement électromagnétique auquel il sera confronté en conditions opérationnelles. De même, les méthodes d'analyse des données mesurées sont également pensées en fonction des systèmes à protéger. On ne peut concevoir un procédé unique de caractérisation d'environnement et établir des modèles d'environnement électromagnétiques exploitables pour tous les systèmes. Ainsi, l'évolution continue des systèmes embarqués et des protocoles engendrent nécessairement des nouveaux besoins de caractérisation d'environnements électromagnétiques auxquels il faut répondre.

Actuellement, on peut illustrer ce besoin à travers les travaux à mener pour accompagner les solutions d'accès à internet aux usagers à bord des trains. Apporter internet à bord des trains, avec une liaison de qualité, constitue un élément d'attractivité important pour les voyageurs. Il s'agit de fournir du confort ou de permettre aux usagers d'optimiser le temps passé à bord du train en poursuivant leurs activités professionnelles qui peuvent nécessiter une connexion à internet de qualité et sécurisée. Dans ce contexte, la SNCF travaille sur le développement d'une solution basée sur une liaison LTE entre le train et l'infrastructure de communication au sol, relayée par une liaison en Wi-Fi à bord des voitures. Dans ce contexte, nous avons commencé à travailler sur la caractérisation de l'environnement EM agissant sur la réception LTE à bord du train et sur la liaison Wi-Fi dans la voiture. Ce travail vient de débuter avec la thèse d'Olivier Stienne. Ce travail qui constitue une perspective immédiate dans mes travaux comporte deux aspects. D'une part, il comporte une étude de susceptibilité approfondie des communications LTE à différents cas d'interférences transitoires ou continues pour identifier

les paramètres d'interférences les plus influents sur la dégradation de la liaison et comporte des travaux expérimentaux et de simulation. D'autre part, il s'agit de procéder à des mesures pertinentes et à extraire des modèles d'interférence représentatifs des interférences potentiellement agressives pour le système de communication. Ce travail comporte des aspects expérimentaux et des analyses statistiques. Par la suite, nous envisagerons également de travailler sur le bilan global de la liaison comprenant un lien LTE en dehors du véhicule et un lien Wi-Fi à l'intérieur du train, face à des scénarios d'interférences EM émulant les conditions internes et externes.

De plus, je devrais également démarrer prochainement des travaux sur la caractérisation des interférences EM dans le domaine du rail aux plus basses fréquences. L'objectif étant de tenter de récupérer de l'énergie de ces émissions indésirables pour alimenter des capteurs ponctuels, qui viennent équiper les infrastructures ferroviaires. Ces travaux seront menés en collaboration avec Divitha Seetharamdoo, chercheuse au LEOST.

Le thème « interférences électromagnétiques intentionnelles » est celui qui se développe le plus aujourd'hui. Je suis impliquée dans plusieurs projets en cours et à venir qui traitent cette question, en particulier avec l'IRT Railenium. Les travaux que je mène sur ce sujet s'articulent autour de trois objectifs : identifier les interférences intentionnelles les plus nuisibles aux différents systèmes considérés, mettre en œuvre des techniques de surveillance et de détection d'attaques, et identifier des méthodes assurant une meilleure résilience des communications vis-à-vis des perturbations EM, pour des applications critiques.

Je traite actuellement ces différents aspects pour le Wi-Fi et le LTE et je vais prochainement débiter des travaux sur les solutions satellitaires et les protocoles LoRA et SigFox pour des applications IoT. Les travaux menés sur les systèmes existants permettent d'identifier des solutions qui pourraient être implémentées dans le cadre de la future radio cellulaire 5G. Je dois également préciser que les travaux que je mène sur la surveillance et la détection des attaques, sont développés en collaboration avec Christophe Gransart, Éric Simon et Anthony Fleury. Grâce aux compétences de ces collègues, nous commençons à élargir les types d'attaques considérées. En particulier, en supplément des attaques par brouillage intentionnel, nous nous intéressons à certaines attaques protocolaires telles que des attaques qui consistent à envoyer des ordres de dé-authentification ou encore qui mettent en œuvre de faux points d'accès. Les techniques de surveillance que nous étudions se répartissent sur les couches physique et liaison de données. Sur la couche physique, nous développons des algorithmes de détection sur des données spectrales et temporelles, pouvant employer des techniques de classification pour distinguer les modes d'attaque. Parallèlement, Christophe Gransart travaille sur l'analyse de la couche liaison de données pour compléter la surveillance et identifier des attaques non détectables au niveau de la couche physique. Il s'agit ainsi de proposer des méthodes de surveillance par les couches les plus basses du modèle OSI (Open Systems Interconnection) afin d'apporter des solutions de détection complémentaires aux systèmes de détection d'intrusions (ou IDS : Intrusion Detection System) actuels qui travaillent sur les couches plus hautes.

Ces travaux se complètent par des travaux plus larges également menés dans le cadre du projet SECOURT du programme régional ELSAT2020 pour proposer des architectures intégrant et exploitant les fonctions de surveillance et de détection pour les véhicules connectés. Ce projet régional que je co-anime avec Smail Niar, nous a permis de nous regrouper avec

plusieurs autres chercheurs de la région pour mener des travaux communs autour des thèmes de la cyber sécurité et de la surveillance par les couches les plus basses. Nous bénéficions ainsi de compétences pluridisciplinaires (informatique, cyber sécurité, traitement du signal, électromagnétisme, télécommunications...) pour aborder des questions de cyber sécurité pour les infrastructures et applications critiques. Nous cherchons également à développer des plateformes expérimentales mutualisées pour les besoins de ces travaux.

Enfin, dans les années à venir, je souhaiterais également m'investir à nouveau dans le montage d'un projet européen. En effet, l'expérience de coordination du projet SECRET m'a laissé un très bon souvenir et un nouveau montage serait également l'occasion de développer de nouveaux travaux en soutien avec une initiative européenne qui m'intéresse tout particulièrement. Il s'agit de la fondation EISAC (European Infrastructures Simulation and Analysis Centre) qui a émergé du réseau d'excellence CIPRNET (Critical Infrastructures Preparedness and Resilience Research Network). Cette fondation vise à construire un centre européen de compétences et d'expertises dans la protection des infrastructures critiques vis-à-vis de différentes menaces. Elle se composerait de plusieurs noyaux en Europe possédant des compétences spécifiques et œuvrerait au service des gestionnaires d'infrastructures critiques. Je pense que les travaux que nous menons sur les attaques EM et autres cyber attaques, pourraient trouver leur place dans une telle initiative européenne.

Dans la communauté scientifique internationale, je suis depuis plusieurs années présidente de la commission « interférence électromagnétique » de l'URSI France et en août 2017, j'ai été élue vice-présidente de la commission internationale. Dans la mesure où le vice-président élu remplace automatiquement le président au bout de son mandat, je prendrai donc la présidence de la commission internationale à l'occasion de la prochaine assemblée générale internationale qui se tiendra en 2020 à Rome. Actuellement en tant que vice-chair, je participe à l'élaboration des programmes des conférences de l'URSI (AT-RASC, AP-RASC et URSI-GASS) et à la sélection des contributions. Dans le cadre de cette fonction, je suis également impliquée dans le comité éditorial du Radio Science Bulletin. Ainsi, au cours de mes mandats de vice-présidente et de présidente, je travaille à faire émerger des collaborations, à renforcer les rencontres internationales et les échanges sur des thèmes d'actualité qui concernent la commission interférences électromagnétiques. Parallèlement, je souhaite, également, contribuer à renforcer la présence des femmes au sein des manifestations et actions de l'URSI. En particulier, dans le cadre des réunions de l'URSI internationale, j'ai récemment proposé des actions dans ce sens, notamment en suggérant au bureau d'inviter davantage de femmes pour les conférences plénières.

Concernant, mes activités d'enseignement, après avoir donné uniquement des enseignements en compatibilité électromagnétique pendant plusieurs années, le contenu de mes enseignements a significativement évolué au cours des deux dernières années. En effet, mes travaux sur les interférences EM intentionnelles et la susceptibilité des systèmes de communication intéressent plusieurs formations. Ainsi, depuis deux ans, mes enseignements se concentrent davantage sur ces aspects. En particulier, cette année, Éric Simon et moi-même avons construit un module intégrant un cours magistral et un temps de travaux pratiques sur les systèmes de communications dans les transports et le brouillage intentionnel dans le cadre d'un master pour les salariés de la société Orange. Ce module ayant été particulièrement apprécié par les élèves, il sera reconduit avec un volume horaire plus important l'an prochain.

Sur ce thème, j'ai également donné, en commun avec l'ANSSI, un short course en août 2017 dans le cadre de l'assemblée générale de l'URSI qui a reçu une bonne audience. D'une manière générale, les travaux que nous menons sur la susceptibilité des différentes solutions de communication et sur les techniques de surveillance et de détection d'attaque par la couche physique sont assez originaux et reçoivent beaucoup d'intérêts. J'ai ainsi été récemment contacté par l'université Helmut-Schmidt à Hambourg pour intervenir sur ce thème auprès d'élèves officiers.

En parallèle de mes activités de recherche, je poursuis également des activités d'expertise ou encore j'interviens de manière plus ponctuelle dans certains projets en tant qu'expert CEM. Je peux citer mes travaux en cours et à poursuivre dans le cadre d'un projet ADEME nommé E-Way sur la faisabilité d'un corridor électrique pour le déplacement des poids lourds entre le grand Paris et le Havre. Dans ce projet, il s'agit de lister les problématiques spécifiques de CEM qui peuvent apparaître selon les technologies d'électrification des véhicules, à savoir par caténaire, par rail d'alimentation dans le sol ou encore par induction magnétique. Dans le cadre de ces travaux, au cours des années à venir je devrais maintenir une veille sur ce thème pour accompagner les choix technologiques qui devront être effectués.

Je mène également une expertise pour Eurotunnel dans le cadre d'un projet d'installation d'un câble très haute tension à l'intérieur du tunnel ferroviaire. Mon expertise consiste à étudier et commenter les travaux menés par la société Siemens en vue d'évaluer la CEM entre l'installation très haute tension et les équipements ferroviaires. Ces travaux d'expertise s'inscrivent parfaitement bien dans mon activité générale et par conséquent je souhaite poursuivre ces activités qui me procurent un échange continu avec les industriels et me permettent de comprendre leur problématiques et besoins au quotidien. De plus, ce sont les connaissances acquises au cours de mes travaux de recherche sur les caractéristiques des environnements électromagnétiques dans les transports et les susceptibilités des solutions de communications qui me permettent de répondre à ces expertises.

Plus récemment, j'ai également pris en charge, à la suite d'El Miloudi El Koursi, l'animation d'une étude pour le compte de la Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) qui dans une première phase, consistait à établir une cartographie des projets qui ont été menés au cours des 10 dernières années dans le domaine de la sûreté dans les transports. La deuxième phase qui est en cours, se concentre sur une liste réduite de projet pour en extraire des éléments (résultats, constats) contribuant à l'élaboration de la doctrine sûreté dans les transports terrestres. Ce travail m'éloigne quelque peu de ma discipline scientifique, mais il me permet de mener des travaux en appui aux politiques publiques. Pour mener à bien cette étude, nous avons dû dépasser le cadre strictement académique et constituer une équipe transdisciplinaire avec plusieurs collègues, dédiée à la sûreté des infrastructures critiques. Cette équipe constitue un premier noyau, qui dans le contexte actuel de forte demande en matière de recherche pour la sûreté, pourrait permettre à l'IFSTTAR de renforcer ses positions sur ce thème.

VII. Bibliographie

- [1] IEC 61000-4-20: 2003, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emissions and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides, 2003.
- [2] V. Deniau, J. Rioult, Phase Stirring of Electromagnetic Field to Test the Susceptibility of Electronic Equipments in Lower Frequencies, Institute of Physics Publishing, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 2048-2055, août 2006.
- [3] A. Picard, F. Fouquet, V. Deniau, A. Louis, B. Mazari, B. Démoulin, Perturbations induites par un câble de servitude lors de la mesure en cellule TEM tridimensionnelle, CEM06, Saint Malo, avril 2006.
- [4] M. Largen, Etude de la capacitance d'un équipement électromagnétique, Université de Bordeaux I, Master Ingénierie Mathématique mention « calcul Scientifique et Applications », rapport de stage d'avril à septembre 2007, ISRN : INRETS/RE-07-725 FR.
- [5] V. Deniau, J. Rioult, B. Démoulin, S. Ficheux : Utilisation des propriétés des cellules TEM au sein d'une chambre réverbérante, 5ème colloque international JFMMA et Telecom 2005, Rabat, Maroc, mars 2005.
- [6] V. Deniau, M. Klingler, B. Démoulin, J. Rioult, S. Ficheux, J-P. Ghys, Electromagnetic Radiation Measurements in Two Specific Models of Three-Dimensional TEM cells, publication au 16th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on EMC, Zurich, Suisse, février 2005.
- [7] V. Deniau, J. Rioult, Impact d'un septum sur les coefficients de qualité et d'efficacité de brassage de la chambre réverbérante à brassage de modes de l'UTAC, Rapport de campagne de mesures et analyse des résultats, n° ISRN INRETS/RR-05-721-FR, 23 pages, décembre 2005.
- [8] V. Deniau, Dimensions et installation des septa et impact sur les coefficients de qualité et d'efficacité de brassage de la chambre réverbérante de l'UTAC, Rapport de campagne de mesures et analyse des résultats, n° ISRN INRETS/RR-05-722-FR, 23 pages, décembre 2005.
- [9] Norme européenne EN 61000-4-21, Compatibilité Electromagnétique, Partie 4-21 : Techniques d'essai et de mesure-Méthodes d'essai en chambre réverbérante, février 2004.
- [10] V. Deniau, J. Rioult, B. Démoulin, S. Ficheux, Utilisation des propriétés des cellules TEM au sein d'une chambre réverbérante, 5ème colloque international JFMMA et Telecom 2005, Rabat, Maroc, mars 2005.
- [11] V. Deniau, M. Klingler, B. Démoulin, J. Rioult, S. Ficheux, J-P. Ghys, Electromagnetic Radiation Measurements in Two Specific Models of Three-Dimensional TEM cells, 16th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on EMC, Zurich, Suisse, février 2005.
- [12] S. Leman, L. Koné, V. Deniau, S. Baranowski, B. Démoulin, Improvement of the Reverberation Chamber performances below the Starting Frequency, conférence invitée à PIERS2007 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, République tchèque, août 2007.
- [13] V. Deniau, L. Koné, J. Rioult, S. Baranowski, Utilisation des CRBM en mode temporel : illustration par des mesures d'efficacité de blindage, conférence CEM, Salon Microwave & RF, Paris, 4 avril 2012.

- [14] V. Deniau, L. Koné, M. Ayad, B. Renoncourt, J. Rioult, Study of pulse waveforms for testing in Mode Stirred Reverberating Chamber, EMC Europe 2011, pp. 778-783, York, Angleterre, septembre 2011.
- [15] H. Ouaddi, V. Deniau, L. Koné, J. Rioult, Impact de la configuration d'essai lors d'émissions rayonnées en chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) et en chambre anéchoïque, Colloque International TELECOM'2007 & 5ème JFMMA, Fes, Maroc, mars 2007.
- [16] X. Lagrange, P. Godlewski, S. Tabbane, Réseaux GSM-DCS, Editions Hermès, Paris, 1995, 1996.
- [17] B. Marichal, Rapport de stage 1ère année IMA Polytech' Lille, Etude de la corrélation entre la distribution des courants dans les parois et la distribution du champ électromagnétique dans le volume d'essai en Chambre Réverbérante à Brassage de Mode (CRBM), juillet 2008.
- [18] B. Démoulin, P. Besnier, Les chambres réverbérantes en électromagnétisme (collection Télécom), Institut Télécom et Lavoisier, 2010.
- [19] IEC 61000-4-21: 2011, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods.
- [20] M.O. Hatfield, Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, Issue: 3, pp. 229-238, août 1988.
- [21] UIC Project EIRENE, System Requirements Specifications, Spécifications que doit respecter le système de communication numérique ferroviaire européen, v14.0, 21 octobre 2003.
- [22] Rohde & Schwarz, CMU operating manual, v4-50.
- [23] S. Dudoyer, V. Deniau, R. Adriano, M. N. Ben Slimen, J. Rioult, B. Meyniel, M. Berbineau, Study of the Susceptibility of the GSM-R Communications to the Electromagnetic Interferences of the Rail Environment, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 54, Issue: 3, pp. 667 – 676, 2012.
- [24] R. Adriano, N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau, P. Massy, Prediction of the BER on the GSM-R communications provided by the EM transient disturbances in the railway environment, EMC Europe 2008, pp. 771-775, Hamburg, Allemagne, septembre 2008.
- [25] ETSI EN 300 910, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Radio transmission and reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
- [26] S. Dudoyer, V. Deniau, N. Ben Slimen, R. Adriano, Susceptibility of the GSM-R Transmissions to the Railway Electromagnetic Environment, Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), chap. 20, pp. 503-522, 2012.
- [27] N. Ben Slimen, Recherche de procédures de caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des systèmes de communications embarqués, Thèse de Doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2009.
- [28] N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer, S. Baranowski, Statistical characterisation of the EM interferences acting on GSM-R antennas fixed above moving train, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 48, Issue: 2, pp. 1-7, 2009.
- [29] B. Proutière, Contribution à la caractérisation du bruit électromagnétique (EM) engendré par un arc électrique entre une ligne et un plan de masse, Rapport de stage ingénieur, 2007.
- [30] V. Deniau, N. Ben Slimen, J. Rioult, Générateur de scénario de bruit électromagnétique, INRETS, Application number CN20098135317 20090710, 28/09/2011,

- https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20110928&CC=CN&NR=102204151A&KC=A#
- [31] V. Deniau, N. Ben Slimen, S. Baranowski, H. Ouaddi, J. Rioult, N. Dubalen, Characterisation of the EM Disturbances Affecting the Safety of the Railway Communication Systems, European Physical Journal – Applied physics, Vol. 43, pp. 225-230, 2008.
- [32] <http://www.trend-eu.org/index.html>
- [33] E. Karadimou, R. Armstrong, I. Adin, V. Deniau, J. Rodriguez, D. Galar, S. Niska, J. Tamarit, An EMC study on the interoperability of the European railway network, 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 428 - 433, Dresden, Allemagne, 2015.
- [34] <https://www.cst.com/>
- [35] H. Fridhi, V. Deniau, J.P. Ghys, M. Heddebaut, J. Rodriguez, I. Adin, Analysis of the coupling path between transient EM interferences produced by the catenary-pantograph contact and on-board railway communication antennas, ICEAA2013, pp. 587-590, Turin, Italy, septembre 2013.
- [36] I. Adin, J. Melendez, V. Deniau, H. Fridhi, R. Armstrong, E. Karadimou, J. Rodriguez, Projet TREND, REPORT D.5.3&5.4&5.5 Definition of the representative worst case conditions and limits of emissions, Confidential, avril 2013.
- [37] V. Deniau, H. Fridhi, D. Valderas, I. Adin, R. Armstrong, E. Karadimou and E. Rodriguez, Projet TREND, Report D.4.4, Comparisons and validation of the model, Confidential, avril 2013.
- [38] A. Cozza, Railway EMC: Assessment of Infrastructure Impact, Thèse de Doctorat à Politecnico Di Torino, juin 2005.
- [39] A. Cozza, B. Démoulin, On the Modeling of Electric Railway Lines for Assessment of Infrastructure Impact in Radiated Emission Tests of Rolling Stock, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, Issue: 3, pp. 566-576, août 2008.
- [40] T. Hammi, S. Baranowski, V. Deniau, J. Rioult, H. Ouaddi, G. Nottet, M. Ayad, Characterisation of the EM disturbances produced by railway substations by time-frequency analyses, EMC Europe 2010, Wroclaw, Poland, septembre 2010
- [41] M. Ayad, H. Ouaddi, V. Deniau, S. Baranowski, J. Rioult, G. Nottet, Caractérisation et modélisation des émissions EM rayonnées par les lignes d'électrification ferroviaires, TELECOM2011 & 7ème JFMMA, Tanger, Maroc, mars 2011.
- [42] S. Baranowski, H. Ouaddi, V. Deniau, J. Rioult, G. Nottet, Modelisation of EM Field Radiated by Catenaries and Due to the Railway Power System, EMC Europe 2012, Rome, Italie, septembre 2012.
- [43] V. Deniau, J. Rioult, S. Baranowski, H. Ouaddi, G. Nottet, Measurements and Post-Processing for Achievement of Electromagnetic Transient Interference Models, EMC Europe 2012, Rome, Italie, septembre 2012.
- [44] M.R. Kousri, Recherche d'un outil d'analyse de l'environnement électromagnétique dimensionné pour les problématiques de compatibilité EM propres au monde ferroviaire, Thèse de Doctorat à l'Université de Lille, juillet 2016.
- [45] M.R. Kousri, V. Deniau, M. Heddebaut, S. Baranowski, Evaluation of the Impact of Transient Disturbances on Railway Signaling Systems Using an Adapted Time-Frequency Analysis Method, International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 63, Issue: 4, pp. 347-354, 2017.
- [46] Y. Balghiti, B. Meyniel, J. Orion, F. Maumy, E. Francois, P. Besnier, M. Drissi, Proposal of

- a specific test methodology to assess the radiate immunity behavior of a data transmission from beacon to train, 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 485 – 488, Suisse, 2009.
- [47] Matlab, «gausswin», <http://fr.mathworks.com/help/signal/ref/gausswin.html>.
- [48] S. Midya, R. Thottappillil, An Overview of Electromagnetic Compatibility Challenges in European Rail Traffic Management System, *Journal of Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, (Ed.), Vol. 16C, pp. 515-534, 2008.
- [49] S. Dudoyer, Méthode de Détection et de Reconnaissance de Bruits Electromagnétiques Permettant la Prédiction de leurs Effets, Thèse de Doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2013.
- [50] S. Dudoyer, V. Deniau, S. Ambellouis, M. Heddebaut, A. Mariscotti, Classification of Transient EM Noises Depending on their Effect on the Quality of GSM-R Reception, *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, Vol. 5, pp. 867-874, 2013.
- [51] R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork, *Pattern Classification (2nd Edition)* Edited by Wiley-Interscience, 2000.
- [52] T.S. Tabatabaei, S. Krishnan, A. Anpalagan, SVM-based classification of digital modulation signals, *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, pp. 277-280, octobre 2010.
- [53] D. Månsson, R. Thottappillil, M. Bäckström, “Vulnerability of European Rail Traffic Management System to Radiated Intentional EMI”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 50, Issue: 1, pp. 101-109, février 2008.
- [54] Mobile & Personal Communications Committee, Use of Jammer and Disabler Devices for Blocking PCS, Cellular & Related Services of the Radio Advisory Board of Canada, RABC Publication 01.3, Ottawa, Canada, 2001.
- [55] D. Månsson, Susceptibility investigations and classification of civilian systems and equipment, Thèse de Master Université d' Uppsala, 2008.
- [56] D.V. Giri, F.M. Tesche, Classification of intentional electromagnetic environments (IEME), *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 322-328, 2004.
- [57] C. Shahriar, M. La Pan, M. Lichtman, T.C. Clancy, R. McGwier, R. Tandon, S. Sodagari, J. H. Reed, PHY-layer resiliency in OFDM communications: A tutorial, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 17, Issue: 1, pp. 292-314, 2015.
- [58] R. Poisel, *Modern communications jamming principles and techniques*. Artech House, 2011.
- [59] M. Lichtman, J.D. Poston, S.Dhiraj Amuru, C. Shahriar, T. C. Clancy, R. M. Buehrer, J. H. Reed, A Communications Jamming Taxonomy, *IEEE Security & Privacy*, Vol. 14, Issue: 1, 2016.
- [60] G. Romero, Vulnérabilité du standard de communication 802.11n vis-à-vis d'environnements interférents caractéristiques du milieu opérationnel ferroviaire, Thèse de Doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (LILLE 1), décembre 2017.
- [61] V. Deniau, C. Gransart, G. Romero, E.P. Simon, J. Farah, IEEE 802.11n Communications in the Presence of Frequency-Sweeping Interference Signals, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 59, Issue: 5, pp. 1625-1633, 2017.
- [62] IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks–specific requirements part 11: Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - redline, IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007) -

Redline, pp. 1– 5229, mars 2012.

- [63] G. Baker, Schoolboy hacks into city's tram system, <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/1575293/Schoolboy-hacks-into-citys-tram-system.html>, 2008.
- [64] S. Mili, Caractérisation et modélisation d'environnements EM transport pour la reconnaissance de conditions EM critiques, Thèse de Doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (LILLE 1), octobre 2014.
- [65] T.L. Jensen, T. Larsen , Robust Computation of Error Vector Magnitude for Wireless Standards, IEEE Transactions on Communications, Vol. 61, Issue: 2, pp. 648-657, février 2013.
- [66] F. Huo, G. Gong, XOR Encryption Versus Phase Encryption, an In-Depth Analysis, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, Issue: 4, pp. 903-91, 2015.

VIII. Publications annexées

1. Rapport d'évaluation du projet européen FP7 SECRET par la Commission Européenne, mars 2016.
2. V. Deniau, C. Gransart, G. L. Romero, E.P. Simon, J. Farah, IEEE 802.11n Communications in the Presence of Frequency-Sweeping Interference Signals, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, Issue: 5, pp. 1625-1633, 2017.
3. M. R. Kousri, V. Deniau, M. Heddebaut, S. Baranowski, Evaluation of the Impact of Transient Disturbances on Railway Signaling Systems Using an Adapted Time-Frequency Analysis Method, International Journal of Electronics and Telecommunications, Vol. 63, Issue: 4, pp. 347-354, 2017.
4. V. Deniau, Overview of the European Project Security of Railways in Europe against Electromagnetic Attacks (SECRET), IEEE magazine on Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Compatibility Magazine IEEE , Vol. 3, Issue: 4, pp. 80-85, 2015.
5. S. Mili, D. Sodoyer, V. Deniau, M. Heddebaut, Detection of electromagnetic jamming signals interfering with a railway track-to-train radio communication, Journal of telecommunications Vol. 27, Issue: 2, 2014.
6. S. Dudoyer, V. Deniau. S. Ambellouis, M. Heddebaut, A. Mariscotti, Classification of Transient EM Noises Depending on their Effect on the Quality of GSM-R Reception, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, Issue: 5, pp. 867-874, 2013.
7. N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer, S. Baranowski, Statistical characterisation of the EM interferences acting on GSM-R antennas fixed above moving train, Eur. Phys. J. Appl. Phys, Vol. 48, Issue: 2, pp. 1-7, 2009.
8. V. Deniau, J. Rioult, Phase Stirring of Electromagnetic Field to Test the Susceptibility of Electronic Equipments in Lower Frequencies, Institute of Physics Publishing, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 2048-2055, 2006.