

THESE

Présentée à

**L'UNIVERSITE des SCIENCES et TECHNOLOGIE de LILLE
(LILLE 1)**

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR en ELECTRONIQUE

Par

Mohamed Nedim BEN SLIMEN

**Recherche de Procédures de Caractérisation de l'Environnement
Electromagnétique Ferroviaire Adaptées au Contexte des
Systèmes de Communications Embarqués.**

Soutenue le 18 décembre 2009

Membres du jury :

Flavio CANAVERO

Rapporteur

Alain REINEIX

Rapporteur

Virginie DENIAU

Examineur et encadrant INRETS

Benoît MEYNIEL

Examineur

Philippe MASSY

Invité

Bernard DEMOULIN

Co-directeur de Thèse

Sylvie BARANOWSKI

Directeur de Thèse

REMERCIEMENTS

Ces travaux, financés par la région du Nord Pars de Calais et l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), ont été réalisés en collaboration entre le laboratoire TELICE de l'IEMN et le laboratoire LEOST de l'INRETS avec l'aide et la participation de plusieurs personnes que je tiens à remercier chaleureusement :

Mon directeur de thèse, madame Sylvie BARANOWSKI, pour m'avoir soutenu, motivé et aidé efficacement avant et au cours de ces trois années de thèse.

Mon co-directeur de thèse, monsieur Bernard DEMOULIN, pour m'avoir toujours soutenu et guidé à chaque fois que j'ai demandé ses précieux conseils. Vous m'avez fait découvrir la CEM et vous m'avez toujours encouragé dans les moments difficiles, je tiens donc à vous exprimer ma profonde reconnaissance et mes respects.

Mon encadrant, madame Virginie DENIAU, chargée de recherche INRETS pour m'avoir suivi, guidé et encouragé dans tous les moments de cette thèse de par sa disponibilité, la qualité de ses conseils et ses qualités humaines et scientifiques.

Madame Marion BERBINEAU, directrice du laboratoire LEOST qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui m'a offert son aide et ses conseils tout au long de ces travaux.

Monsieur Pierre DEGAUQUE directeur du laboratoire TELICE et monsieur Alain CAPY directeur de l'IEMN.

Messieurs Flavio CANAVERO et Alain REINEIX pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Messieurs Philippe MASSY et Benoît MEYNIEL pour m'avoir fait l'honneur d'assister à ma soutenance de thèse.

Monsieur Jean RIOULT, ingénieur INRETS, pour tout le temps qu'il a consacré pour moi et l'aide qui m'a apporté tout au long de mon séjour au LEOST par ses conseils et le partage de ses connaissances dans le domaine des mesures expérimentales et l'acquisition des données.

Mademoiselle Stephen DUDOYER et monsieur Ricardo ADRIANO pour toute leur aide, leurs conseils et leur disponibilité et bonne humeur.

Madame Nicole DUBALEN, messieurs Philippe MASSY et Alain RAUX, pour leur entière collaboration, leur disponibilité et leur aide pour faciliter l'organisation et la réalisation des campagnes de mesure à bord des trains en France.

L'ensemble des conducteurs d'essais et le personnel de la SNCF et de la SNCB qui nous ont aidés directement ou indirectement lors des campagnes de mesure réalisées en France et en Belgique.

L'ensemble du personnel permanent, contractuel et les autres étudiants des laboratoires du site de Villeneuve d'Ascq de l'INRETS et du TELICE. Je n'oublie pas les personnels du pôle de gestion, du service de reprographie et les fameux Bernard et Emmanuel pour la bonne ambiance qu'ils contribuent à maintenir au quotidien.

Enfin, je remercie mes parents et mon frère pour leur soutien au cours de toutes mes années d'études en Tunisie et en France.

Table des matières

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

I. EVOLUTION DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE	7
II. SYSTEMES DE COMMUNICATION ET DE GESTION DE TRAFIC DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	10
1. Réseaux de communication filaires	10
2. Les balises KVB.....	10
3. Radio analogique.....	11
4. Le système ERTMS.....	12
4.1. Le système Eurobalise	13
4.2. Le système GSM-R.....	14
III. PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES RENCONTREES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	18
1. Perturbations EM issues du matériel roulant	18
2. Perturbations EM provenant de l'infrastructure d'alimentation électrique.....	19
3. Perturbations EM issues des événements EM transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe	20
4. Perturbations EM externes au domaine ferroviaire	22
IV. NORMES CEM RELATIVES AU DOMAINE FERROVIAIRE.....	23
1. Description des normes 50121.....	23
1.1. Objectifs des normes	23
1.2. Caractérisation EM des émissions rayonnées par le système ferroviaire selon la norme EN 50121	24
1.3. Références utilisées dans ces normes	24
2. Besoins normatifs pour protéger les nouveaux systèmes de gestion de trafic	24
V. COMMENT ASSURER LA CEM DU SYSTEME GSM-R AU SEIN DU MILIEU FERROVIAIRE	26
1. Développement d'une méthodologie de caractérisation des perturbations EM reçues par les antennes GSM-R	26
2. Adapter les méthodes de test d'immunité pour les systèmes numériques embarqués.....	27

CHAPITRE 2

I. CARACTERISATION DES ENVIRONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES.....	31
1. Caractérisation dans le domaine fréquentiel.....	34
1.1. Description.....	34
1.2. Avantages et inconvénients d'une caractérisation dans le domaine fréquentiel.....	36
1.2.1. Les avantages de la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel	36
1.2.2. Les inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel.....	37
2. Caractérisation dans le domaine temporel	38
2.1. Description de la méthode employée pour une caractérisation dans le domaine temporel ...	38
2.2. Avantages et inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel	41
2.2.1. Les avantages de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel	41
2.2.2. Les inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel.....	41
II. MISE EN ŒUVRE DES METHODES DE CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT ET POST-TRAITEMENTS ASSOCIES.....	43
1. Description des campagnes de mesure	43
2. Mesures dans le domaine fréquentiel	49
2.1. Comparaison des comportements des deux antennes avec le protocole de mesure adopté ...	51
2.2. Influence de la bande de résolution (RBW) de l'analyseur de spectre sur la mesure des événements transitoires observés par les antennes GSM-R à bord d'un train en mouvement	53
2.3. Influence du type de l'électrification sur les niveaux de bruit EM générés sur les antennes GSM-R embarquées	56
3. Mesures dans le domaine temporel	59
3.1. Description de la configuration de la mesure	60
3.2. Post traitement appliqué sur les mesures temporelles	62
3.2.1. Passage du domaine temporel vers le domaine fréquentiel	62
3.2.2. Application de l'algorithme « Maxhold »	68
III. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR LES DEUX METHODES DE CARACTERISATION	70
1. Description de la configuration de mesure pour comparer les résultats de mesure obtenus par les deux méthodes de caractérisation	70
2. Confrontation des résultats	71
IV. ANALYSE ET CRITIQUE DE CES RESULTATS POUR ETUDIER L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R PAR RAPPORT A CET ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE	78
1. Perturbations électromagnétiques permanentes qui peuvent agir sur l'immunité du système GSM-R	78
2. Perturbations électromagnétiques transitoires qui peuvent agir sur l'immunité du système GSM-R	79

V. NOUVELLE APPROCHE PERMETTANT LA CARACTERISATION DU BRUIT EM TRANSITOIRE EN VUE D'ETUDIER L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R.....	81
---	-----------

CHAPITRE 3

I. CLASSIFICATION DES BRUITS EM RECUS PAR LES ANTENNES GSM-R.....	85
--	-----------

1. Paramètres choisis pour la classification des perturbations EM transitoires reçues par les antennes GSM-R	85
--	----

2. Bancs de mesure développés pour accéder aux paramètres de classification.....	87
2.1. Banc de mesure développé pour accéder aux paramètres intrinsèques des perturbations électromagnétiques transitoires	87
2.2. Banc de mesure développé pour accéder aux paramètres temporels des rafales de perturbations EM transitoires	88

3. Conditions de mesure à bord du train et récapitulatif sur la quantité de données collectée	90
---	----

II. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES (TM, DT) ET D'AMPLITUDE CRETE (A) DES EVENEMENTS TRANSITOIRES OBSERVES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT.....	92
--	-----------

1. Temps de montée.....	92
-------------------------	----

2. Durée temporelle.....	94
--------------------------	----

3. Amplitude crête (A)	97
------------------------------	----

III. ETUDE DES INTERVALLES DE TEMPS (IT) QUI SEPARANT LES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES SUCCESSIVES OBSERVEES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT.....	101
--	------------

1. Importance du nombre d'occurrences des événements transitoires à bord du train	101
---	-----

2. Algorithme de comptage des signaux transitoires.....	103
---	-----

3. Exploitation des résultats	105
-------------------------------------	-----

IV- ETUDE STATISTIQUE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES ET D'AMPLITUDE DES BRUITS EM TRANSITOIRES RENCONTRES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	109
--	------------

1. Etude statistique des temps de montée des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement.....	109
---	-----

2. Caractérisation statistique des durées des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement.....	114
--	-----

3. Impact de la bande passante des antennes sur les caractéristiques temporelles des perturbations EM transitoires	120
--	-----

1. Impact de la bande passante des antennes sur les temps de montée.....	120
--	-----

2. Impact de la bande passante des antennes sur les durées.....	122
---	-----

4. Etude statistique des Amplitudes crêtes (A) des événements EM transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement.....	123
5. Etude statistique des intervalles de temps (IT) qui séparent l'apparition des événements EM transitoires successifs observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement.....	131
V. CONCLUSION.....	134

CHAPITRE 4

I. METHODES EMPLOYEES POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DES SYSTEMES ELECTRONIQUES FACE A DES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES.....	139
1. Méthodes actuelles	139
2. Banc de test mis en œuvre au sein du laboratoire	141
II. DISCUSSION SUR LES SIGNAUX TESTS A APPLIQUER POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R	143
1. Modèle des perturbations transitoires reçues par les antennes GSM-R.....	143
2. Déformation du modèle transitoire par le banc de test	146
3. Définition du signal test	150
III. ANALYSE DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES RESULTATS DE TEST D'IMMUNITE.....	153
1. Récurrence des phénomènes transitoires.....	153
2. Niveau de bruit EM généré sur la bande GSM-R.....	157
IV. VARIATIONS DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES TESTS D'IMMUNITE POUR ETRE REPRESENTATIF DES CONDITIONS REELLES.....	162
1. Variations des intervalles de temps entre les perturbations EM transitoires.....	164
2. Variation du Rapport Signal à Bruit.....	166
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	169

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Face aux problèmes d'interopérabilité des trains transfrontaliers au sein des pays européens, l'Union Européenne (UE) a décidé d'uniformiser les systèmes de gestion de trafic sur l'ensemble des pays de l'UE.

Actuellement, chaque pays européen dispose d'un système de gestion de trafic ferroviaire qui lui est propre. Pour pouvoir circuler dans différents pays, les trains européens transfrontaliers doivent disposer obligatoirement de l'ensemble des systèmes de signalisation et de gestion de trafic utilisés dans chaque pays traversé.

Afin d'éliminer les barrières nationales et garantir l'interopérabilité des systèmes de gestion de trafic au sein du continent, l'UE a opté pour l'utilisation d'un nouveau système de contrôle commande unique sur tout le territoire européen permettant la gestion de trafic ferroviaire. Ce système est basé sur le standard appelé ETCS/ERTMS (European Train Control System/European Railway Traffic Management System). Les premiers tests de faisabilité de cette solution ont été réalisés entre 1999 et 2001 et il est actuellement en cours de déploiement sur différents pays en Europe.

Le standard ETCS/ERTMS utilise principalement deux systèmes de communication numérique ; le système GSM-R qui assure les transmissions de la voix et des informations de trafic entre le train et les centres de contrôle et le système Eurobalise qui permet au train de se localiser sur son trajet. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés au système GSM-R.

Ce système assure un contact continu entre le train et les centres de contrôle par la voix et permet au train de recevoir les informations de signalisation relatives à son trajet. La continuité du service GSM-R est donc déterminante pour la sécurité et le bon fonctionnement du trafic ferroviaire européen. Il faut donc garantir une parfaite fiabilité du système afin d'assurer l'intégrité des données de signalisation et le succès de leur transmission.

D'un point de vue CEM, les systèmes embarqués sont soumis aux perturbations EM permanentes et transitoires présentes au sein de l'environnement ferroviaire. Sachant que le système ferroviaire comporte des installations électriques de puissance qui fonctionnent sur des courants élevés et emploient des systèmes d'électronique de puissance utilisant des composants faisant apparaître des courants transitoires (large bande), il est légitime de penser que les systèmes de télécommunication embarqués qui fonctionnent généralement sur des tensions faibles sont soumis à des conditions EM sévères. On peut aussi s'interroger sur les déformations que subissent les signaux utiles qui atteignent l'antenne GSM-R au sein du milieu ferroviaire et l'impact de ces déformations sur les capacités de fonctionnement du système.

Actuellement, les normes CEM relatives au milieu ferroviaire ne permettent que la caractérisation des perturbations EM observées à 10 mètres du centre des voies ferrées et ne donnent pas d'indications sur les perturbations EM observées au sein même du matériel roulant, en l'occurrence à l'endroit de placement de ces systèmes. Ces normes ont aussi été pensées pour la caractérisation des bruits électromagnétiques tels que les voient des équipements analogiques et ne sont donc pas nécessairement adaptées pour le contexte des systèmes numériques.

De ce fait, rien ne permet actuellement d'appréhender de façon normalisée les niveaux de bruit EM que peut subir le système GSM-R. Ce dernier est déjà installé à bord de certains trains, et peut subir une grande variété de perturbations électromagnétiques rencontrées à bord d'un train en mouvement. L'information utile véhiculée à travers ce système peut donc être affectée.

Néanmoins, pour résister aux perturbations EM, le système GSM-R dispose d'un ensemble de protocoles pouvant lui permettre de corriger certaines trames erronées ou de les renvoyer jusqu'à bonne réception. Mais on peut toutefois s'interroger sur ses capacités à réagir face aux perturbations rencontrées dans le milieu ferroviaire et vérifier son immunité EM au sein de cet environnement.

Pour prédire l'impact des perturbations EM rencontrées à bord d'un train en mouvement sur l'immunité du système GSM-R, il faut avant tout caractériser d'une manière exhaustive l'ensemble des perturbations auxquelles son signal utile sera confronté. Il est donc nécessaire d'élaborer des méthodes de caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des systèmes embarqués tel que le système GSM-R et donc à bord des trains.

Cela signifie qu'il faut prendre en compte le fait que ce système fonctionne sur une gamme de fréquence située autour de 900 MHz et par conséquent, les valeurs de champ électromagnétique peuvent évoluer très rapidement en fonction de la position de mesure. La mobilité du système GSM-R doit aussi être prise en compte, c'est-à-dire que ce système n'est pas continuellement soumis aux mêmes valeurs de perturbations EM et que le niveau de son signal utile n'est pas constant tout au long de son trajet.

Pour pouvoir mettre en œuvre une méthode de caractérisation permettant d'assurer la compatibilité électromagnétique du système GSM-R dans son environnement, il faut également étudier le principe de fonctionnement de ce dispositif afin d'identifier parmi toutes les perturbations EM en présence, celles qui sont susceptibles d'être réellement pénalisantes pour la continuité et la qualité de son service.

A partir de là, une méthode de caractérisation adaptée à ces perturbations peut être mise en place et par la suite une méthode de test d'immunité adaptée au contexte des systèmes numériques de télécommunication embarqués peut être élaborée.

Dans ce travail de thèse, nous avons donc cherché à caractériser l'ensemble des perturbations EM reçues par les antennes GSM-R à bord d'un train en mouvement. Une analyse exhaustive de ces perturbations a été réalisée aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel afin d'appréhender leurs effets sur le signal de télécommunication véhiculé au sein du canal de transmission du système GSM-R. On a cherché par la suite à évaluer l'impact de ces perturbations sur l'intégrité des données et identifier les bruits EM les plus pénalisants.

Pour cela, nous avons mené des tests d'immunité du système GSM-R face à des bruits électromagnétiques visant à reproduire les conditions les plus pénalisantes qu'il peut rencontrer à bord d'un train en mouvement et évaluer ainsi les risques potentiels qu'il peut rencontrer dans le milieu ferroviaire.

Cette thèse est organisée suivant quatre chapitres :

Le premier chapitre vise à mettre en évidence les nouvelles problématiques de CEM qui surgissent avec l'intégration de dispositifs de communication numériques à bord des trains. Ainsi, les grandes évolutions technologiques du monde ferroviaire et notamment celles qui portent sur les systèmes de communication et de gestion de trafic des trains au cours des dernières décennies sont présentées. Les principales perturbations EM rencontrées au sein de l'environnement ferroviaire seront ensuite décrites afin d'évoquer les risques potentiels que subissent les systèmes de communication embarqués d'un point de vue CEM.

Le deuxième chapitre décrit tout d'abord les méthodes employées en CEM pour la caractérisation des environnements électromagnétiques, en l'occurrence la méthode fréquentielle et la méthode temporelle. Ensuite, ces méthodes sont mises en œuvre pour caractériser les bruits électromagnétiques reçus par les antennes GSM-R à bord d'un train en mouvement, à travers des campagnes de mesures réalisées sur des trains d'essai de la SNCF. Cependant, ces premières mesures ont été programmées en n'ayant aucune connaissance préalable des perturbations EM reçues par les antennes GSM-R. Une critique de ces méthodes et de leurs résultats au vu d'une étude de l'immunité du système GSM-R est donc présentée. L'analyse de ces premiers résultats, permettra également d'identifier les principales sources de bruits EM pouvant être pénalisantes pour le GSM-R afin de se focaliser sur les types de bruit électromagnétique qui risquent de nuire le plus à l'intégrité des informations véhiculées à travers le système GSM-R.

Le chapitre III se focalise sur les perturbations EM qui semblent les plus néfastes en raison des fréquences qu'elles couvrent et de leur récurrence, à savoir les perturbations EM transitoires qui surgissent lors des mauvais contacts entre la caténaire et le pantographe. Face à la variété des bruits transitoires collectés au cours d'un trajet, des paramètres de classification ont du être définis pour étudier statistiquement les multiples perturbations reçues par les antennes. Les études statistiques de ces paramètres seront donc présentées.

Le dernier chapitre vise à évaluer l'effet des perturbations transitoires observées sur les transmissions GSM-R. Il s'agit donc d'une étude de l'immunité du système GSM-R face à des bruits EM transitoires dont les caractéristiques doivent être représentatives des bruits observés à bord d'un train. Pour mener cette étude, un banc d'essai a été développé à cet effet au sein du laboratoire et des signaux de tests ont du être définis. Ces travaux seront décrits en détail afin d'identifier les facteurs qui définissent les bruits EM et qui influent essentiellement sur la qualité des transmissions GSM-R, pour finalement envisager des méthodologies appropriées pour que les essais soient représentatifs des conditions rencontrées à bord des trains.

Chapitre 1

L'Environnement Ferroviaire

Résumé : Ce premier chapitre vise à illustrer les nouveaux besoins en matière de CEM dans le domaine ferroviaire. Ainsi, la première section décrit les principales évolutions technologiques sur l'infrastructure et les véhicules ferroviaires depuis les premières voies ferrées, afin de mettre en évidence les problématiques de CEM qui se posent désormais. Nous présentons ensuite quelques uns des nouveaux systèmes de communication intégrés à bord des trains modernes et plus spécialement le système de communication GSM-R sur lequel ce travail de thèse se focalise. Les perturbations EM rencontrées dans le domaine ferroviaire sont présentées dans la troisième partie de ce chapitre. La quatrième partie résume les principales normes CEM actuelles relatives à l'environnement EM ferroviaire. Cette partie montre que ces normes ne conviennent pas pour une caractérisation de l'environnement EM ferroviaire adaptée au contexte des nouveaux systèmes de communication numériques décrits. La dernière partie propose une nouvelle méthodologie permettant d'assurer la CEM entre le système GSM-R et l'infrastructure ferroviaire.

Sommaire :

I. EVOLUTION DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE	7
II. SYSTEMES DE COMMUNICATION ET DE GESTION DE TRAFIC DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	10
III. PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES RENCONTREES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	18
IV. NORMES CEM RELATIVES AU DOMAINE FERROVIAIRE	23
V. COMMENT ASSURER LA CEM DU SYSTEME GSM-R AU SEIN DU MILIEU FERROVIAIRE	26

I. EVOLUTION DE L'INFRASTRUCTURE FERROVIAIRE

Les voies ferrées ont fait leur première apparition en France à la fin de l'année 1820 et depuis elles ont évolué rapidement. En 1930 le réseau ferré français comportait 63 000 km de voies [I-1]. A ses débuts, l'environnement ferroviaire était principalement caractérisé par les voies ferrées, les locomotives thermiques, les gares et les points d'aiguillage et de signalisation.

Après l'utilisation du charbon et pour des soucis de rendement et de vitesse, la traction des trains a évolué vers l'utilisation des machines diesel. Pour des raisons économiques, l'industrie ferroviaire s'est tournée vers l'utilisation des moteurs électriques pour la traction des trains à grande vitesse. Dans les années 1930, les premiers essais des machines électriques ont commencé.

L'introduction des machines électriques au sein de l'environnement ferroviaire a généré des modifications fondamentales sur l'infrastructure ferroviaire. En effet, pour fonctionner, les machines électriques doivent être alimentées en énergie électrique. Une solution basée sur l'utilisation de batteries embarquées était bien entendu écartée et l'alimentation a été assurée par l'intermédiaire d'une caténaire (câble électrique) suspendue au-dessus des voies ferrées. A l'aide d'un contact glissant entre cette caténaire et d'un pantographe installé sur le toit du train le captage du courant est assuré et un câble électrique reliant le pantographe aux machines électriques permet d'alimenter les moteurs des locomotives.

Afin de donner aux trains des couples de démarrage importants, des moteurs électriques à courant continu ont été utilisés puisque les moteurs synchrones n'offraient pas encore cet avantage. Les alimentations électriques utilisées étaient généralement de 1500 V DC ou 3000 V DC.

Le choix d'une alimentation en courant continu était motivé par le fait qu'on ne savait pas récupérer l'énergie lors des descentes et des freinages du train avec des alimentations alternatives. Malheureusement, les valeurs de tensions relativement faibles utilisées avec les alimentations à courant continu imposaient des courants électriques élevés compte tenu de la puissance nécessaire au bon fonctionnement des trains. Dans cette configuration, trois problèmes majeurs ont été rencontrés :

- le transport d'énergie nécessite l'utilisation de caténaires de grande section et donc des coûts de déploiement importants ;
- le captage difficile du courant électrique d'amplitude élevée au niveau des contacts caténaire-pantographe, nécessite généralement l'emploi de deux pantographes ;
- des chutes de tension importantes surviennent lorsque la source d'alimentation est éloignée de la position du train. Il a donc fallu installer à intervalles rapprochés des sous stations d'alimentation le long des voies ferrées, ce qui a entraîné des coûts élevés de déploiement et augmenté les risques de pollution EM.

Pour pallier ces problèmes, il a été nécessaire d'augmenter les valeurs des tensions d'alimentation afin de réduire les valeurs des courants électriques transportés. Ceci a été possible grâce aux avancées remarquables réalisées en électronique de puissance et en

électrotechnique, apportant des solutions pour récupérer l'énergie électrique sous des réseaux alternatifs, qui eux permettent d'employer des tensions d'alimentation élevées.

De nos jours en France, les lignes à grande vitesse sont toutes alimentées sous 25 000 V AC 50 Hz et la migration du continu vers le 25000 V AC est en cours sur les autres lignes. En parallèle, les moteurs synchrones ont évolué et présentent actuellement beaucoup d'avantages par rapport aux moteurs à courant continu. En effet, les machines synchrones sont plus faciles à entretenir et permettent d'obtenir des couples de démarrage suffisants pour la traction des trains ; ils remplacent de plus en plus les machines électriques à courant continu sur les trains rapides. Ces moteurs présentent aussi l'avantage de fonctionner avec des amplitudes de courant plus faibles que les moteurs à courant continu puisqu'ils sont alimentés par des tensions électriques plus élevées.

Les locomotives qui utilisent encore des moteurs à courant continu mais alimentés sous des réseaux alternatifs, comportent généralement des dispositifs de transformation alternatif / continu et des hacheurs.

En plus de cette infrastructure électrique, le milieu ferroviaire comporte aussi des systèmes de télécommunications utilisés pour la gestion du trafic ferroviaire.

En effet, en France, les vitesses maximales des trains dits TGV actuels peuvent atteindre 320 km/h en vitesse commerciale sur plusieurs tronçons. A ces vitesses, la signalisation de trafic ferroviaire basée sur l'utilisation des feux de signalisation latéraux est devenue inadaptée puisque difficile à détecter par les conducteurs et on estime qu'au-delà de 120 km/h les conducteurs de train ne peuvent plus percevoir correctement la signalisation latérale. Les premiers systèmes de communication ont été donc installés au sein du milieu ferroviaire afin de permettre des communications entre le sol et le train et apporter directement aux conducteurs de trains les informations de signalisation à bord de l'engin moteur. Pour les besoins en termes de sécurité de trafic ferroviaire, dans les années 60 des liaisons radiotéléphoniques entre postes de régulation et engins de traction ont vu leur apparition et se sont développées rapidement dans de nombreux pays [I-2]. Actuellement, les systèmes de télécommunication ont beaucoup évolués et permettent l'amélioration de la capacité et la sécurité des réseaux ferroviaires.

Ainsi, des équipements électroniques et de télécommunication ont été installés à bord des trains et le long des infrastructures permettant la détection de la position des trains ainsi que la transmission d'informations entre les trains et les centres de contrôle. L'outil informatique a été aussi utilisé pour l'analyse et l'interprétation de ces données afin d'offrir au conducteur du train et à travers son tableau de bord, les instructions et les consignes à suivre le long de son parcours. Actuellement, des systèmes de télécommunication numériques ont été intégrés au sein du milieu ferroviaire et sont employés dans le cadre d'un nouveau système de gestion de trafic ferroviaire européen appelé ERTMS (European Rail Traffic Management System) qui sera décrit dans la suite de ce chapitre.

Ainsi, la diversité des technologies employées dans le domaine ferroviaire, rend l'environnement EM ferroviaire de plus en plus complexe à appréhender pour en assurer la compatibilité électromagnétique.

Il s'agit désormais de faire cohabiter des systèmes électriques de puissance et des systèmes numériques ou analogiques de commande et de contrôle qui touchent à la sécurité du moyen de transport.

II. SYSTEMES DE COMMUNICATION ET DE GESTION DE TRAFIC DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

Les systèmes de communication utilisés de nos jours dans le domaine ferroviaire se composent de systèmes de communication filaires et de systèmes de communications sans fil.

1. Réseaux de communication filaires

Dans le domaine ferroviaire les systèmes de communication filaires sont notamment utilisés à bord des trains pour assurer des services aux voyageurs, tels que les messages d'information donnés à l'ensemble des voyageurs sous forme d'information sonore.

Le contrôle et la commande de l'ouverture, fermeture et verrouillage des portes du train ainsi que l'affichage des numéros des voitures sont généralement aussi assurés par un système de communication filaire. Le contrôle du verrouillage des portes des WC du train ainsi que le contrôle des indicateurs de disponibilité des WC sont aussi assurés via un système de communication filaire dédié.

Ces réseaux embarqués sont aussi utilisés pour des fonctions de contrôle et de commande à bord du train, telles que par exemple la commande de freinage. Le lecteur intéressé trouvera un état de l'art sur ces systèmes dans [I-3]

Les réseaux de communication filaires sont aussi utilisés à l'extérieur des trains, ils sont notamment associés aux circuits de voies (CdV) qui permettent la localisation des trains sur les voies et le contrôle de la signalisation latérale. Le CdV est un système de transmission par induction, qui utilise les rails pour connaître l'état d'occupation des voies ou d'une portion de voies (appelée canton). Ce système fonctionne sur des fréquences de l'ordre de 200 kHz.

De façon générale, des réseaux filaires permettent de relier tous les équipements de voie au poste de contrôle-commande.

2. Les balises KVB

Le système KVB ou Contrôle Vitesse par Balises (l'initiale K est généralement utilisée pour ne pas confondre Contrôle avec Commande), est un système utilisé par la SNCF pour le contrôle de la vitesse des trains sur le réseau ferroviaire français et fonctionne sur une fréquence de l'ordre de 27 MHz pour le lien montant et de 4.5 MHz pour le lien descendant. Une première version de ce système a été utilisée dans les années 80 sur le réseau ferroviaire suédois. Il a par la suite été adapté pour être déployé en France.

Une première partie de ce dispositif est installée à bord du train, elle comporte principalement un ordinateur de bord connecté à une antenne fixée sous le train. Cette antenne communique avec des balises fixées au sol (fixées entre les deux rails de la voie) lorsque le train passe au-dessus de ces balises. La Fig. 1. 1. donne une photo d'une balise KVB fixée au sol.



Fig. 1. 1. Balise KVB fixée sur la voie (www.lebmodelisme.com)

En fonction des informations données par les balises, l'ordinateur de bord calcule les courbes de vitesse optimales que le train doit suivre et au cours du trajet compare la vitesse du train avec les courbes calculées. Le système informe ainsi le conducteur à chaque fois que la vitesse du train dépasse les vitesses définies par les courbes de vitesse calculées. Le non respect de ces courbes sur une distance prolongée, entraîne un freinage d'urgence du train.

Le système KVB n'est pas initialement considéré comme un système de signalisation, c'est-à-dire qu'il ne permet pas la transmission des informations liées à la signalisation latérale, tel que les feux de signalisation. Il n'y a qu'à bord des trains à grande vitesse que le système KVB (qui utilise un autre type de balises appelées TVM 430) permet la transmission des signaux correspondant à la signalisation latérale.

3. Radio analogique

La radio est le moyen de communication qui se prête le mieux aux communications à moyenne ou longue distance entre le sol et les trains. Les gammes d'ondes les plus employées jusqu'à aujourd'hui à travers le monde sont les ondes VHF dans la bande 70-88 MHz ou dans la bande 155-220 MHz et les ondes UHF dans la bande 420-470 MHz.

Dans les années 60, la gestion et la régulation du trafic ferroviaire français étaient assurées par des feux de signalisation latéraux placés le long de voies.

En cas de problème observé sur la voie ou à bord du train, le conducteur du train pouvait utiliser des postes téléphoniques fixes placés le long des voies ferrées pour entrer en contact avec les régulateurs de trafic. Ceci, impliquait l'arrêt du train et la descente du mécanicien de bord pour utiliser les postes téléphoniques. Cette solution était peu fiable et inadaptée à une gestion optimisée du trafic ferroviaire.

Dans le milieu des années 70, un nouveau système de télécommunication analogique a été développé pour permettre un contact permanent entre les conducteurs des trains et les régulateurs du trafic ferroviaire. Ce système de télécommunication analogique appelé RST

pour « Radio Sol Train » a nécessité l'implantation de stations radio fixes munies d'antennes le long des voies ferrées et l'installation de systèmes radio à bord des trains [I-4]

La radio a connu un essor considérable notamment en France avec le développement des équipements de radio sol-train à 450 MHz pour les communications vocales de services, puis avec le développement d'une transmission de données pour des applications de télé-contrôle et de télé-maintenance des équipements de trains (à partir de 1988 sur la ligne Paris-Rennes et 1989 pour le TGV Atlantique).

Au milieu des années 80, l'outil informatique a été combiné avec le système RST pour le rendre plus fiable et plus pratique. Ce système a été par la suite généralisé sur la majorité des lignes ferroviaires françaises.

Cependant, le système RST n'a pas été adopté par tous les pays du monde et chaque pays a opté pour un système qui lui était propre pour la gestion de son trafic ferroviaire.

4. Le système ERTMS

Dans chaque pays européen, la gestion du trafic ferroviaire est assurée par un système spécifique qui lui est propre. Ainsi les trains transfrontaliers qui circulent sur le continent européen sont équipés des différents systèmes de gestion de trafic des pays qu'ils traversent afin de pouvoir circuler sur ces différents réseaux.

Les problèmes de coût et les difficultés techniques rencontrés avec l'utilisation de ces différents systèmes de gestion de trafic, ont motivé l'élaboration d'une nouvelle solution permettant l'harmonisation des systèmes de gestion de trafic ferroviaire sur tout le territoire européen afin d'assurer l'interopérabilité des trains au sein de l'Union Européenne (UE).

Pour satisfaire cette volonté d'interopérabilité, l'industrie ferroviaire et l'industrie des télécommunications poussées par l'UE ont développé un système standardisé de gestion de trafic ferroviaire pour tous les pays européens appelé ERTMS dont les premières spécifications ont été publiées en 1994.

Le système ERTMS utilise principalement les systèmes Eurobalise et Euroradio qui repose sur le système cellulaire numérique GSM-R.

La Fig. 1. 2. donne un schéma décrivant le système ERTMS

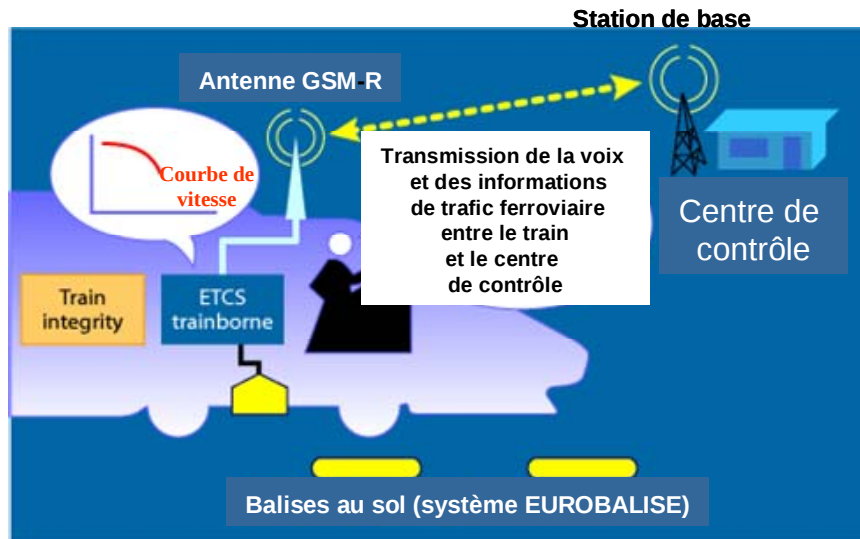


Fig. 1. 2. Schéma présentant les systèmes GSM-R et EUROBALISE (www.ertms.com)

Pour gérer le déploiement progressif du système ERTMS sur le réseau européen, 3 niveaux de déploiement ont été définis. Dans l'état le plus abouti du système (niveau 3), le train calcule sa position et la vérifie par l'intermédiaire des balises au sol puis la transmet au centre de contrôle via le système GSM-R.

Le train réceptionne des informations relatives aux autres trains qui circulent dans son voisinage également via le système GSM-R, puis il détermine seul ses consignes de mouvement. Ainsi, dans la version finale du système (niveau 3) la signalisation latérale aura totalement disparue.

4.1. Le système Eurobalise

Eurobalise est un système de communication qui assure la fonction de localisation ponctuelle des trains. Il utilise des balises fixées au sol (Fig. 1. 3.), le long des voies ferrées et une antenne embarquée d'émission-réception fixée sous les locomotives. Cette antenne est utilisée principalement pour télé-alimenter les balises au sol et capter les signaux EM envoyés par ces dernières vers le train pour l'informer de sa position.

Tout au long du parcours du train, l'antenne embarquée émet en continu une trame binaire connue à 27 MHz (lien descendant), permettant la télé-alimentation ou le « réveil » des balises au passage du train au-dessus d'une balise. Cette dernière capte la trame de réveil et réagit en envoyant au train une trame d'information à une fréquence proche de 4 MHz (lien montant) comportant des informations sur la localisation du train. Par ailleurs, certaines balises sont connectées au centre de régulation et peuvent donner au train, en plus des informations de localisation, des informations complémentaires sur les vitesses limites ainsi que les données de signalisation relatives à l'emplacement du train (comme les feux de signalisation). [I-5]



Fig. 1. 3. Balise ERTMS fixée sur la voie (www.mermecgroup.com)

4.2. Le système GSM-R

Le système GSM-R (Global System for Mobile communication-Railways) est un système de communication sans fil numérique « Sol – Train » basé sur le standard de communication GSM qui permet la transmission de la voix et des informations de signalisation ferroviaires entre les trains et les centres de contrôle.

Afin d'assurer l'interopérabilité des trains sur le réseau ferroviaire européen, ce système est en cours de déploiement dans tous les pays européens. Hors Europe, d'autres pays ont aussi choisi ce système.

Le système GSM-R comporte deux parties :

- le BSS ou « Base Station Sub-system » composé :
 - des stations de base appelées BTS (Base Transceiver Station) installées au voisinage de la voie ferrée. Ces BTS sont connectées par des liaisons filaires avec les centres de contrôle et de maintenance (via les « BSC » pour Base Station Controller). La distance entre les stations de base est aujourd'hui comprise entre 6 et 17 km.
- les antennes GSM-R fixées sur le toit de la motrice (une sur chaque motrice) et un récepteur connecté à l'antenne GSM-R par l'intermédiaire d'un câble blindé (Fig. 1. 4).

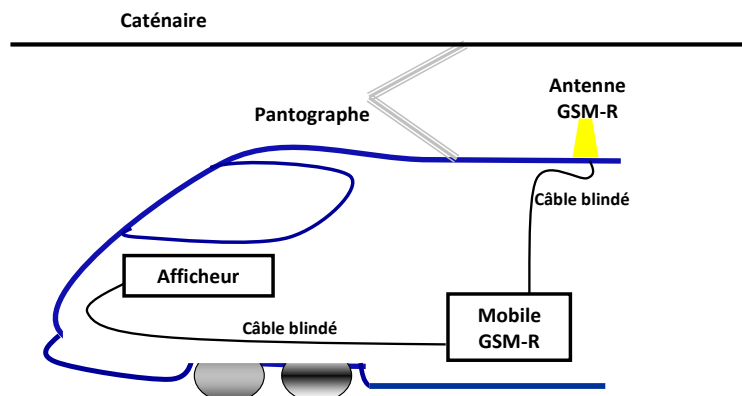


Fig. 1. 4. Schéma de principe de la partie embarquée du système GSM-R

En Europe, le système GSM-R utilise la bande 876 - 880 MHz pour les communications montantes (du train vers les stations de base) et la bande 921 - 925 MHz pour les communications descendantes (des stations de base vers le train). Ces deux bandes sont séparées par une bande de fréquence non attribuée au système GSM-R telle que le montre la Fig. 1. 5. Sur cette figure, la couleur bleue indique la bande GSM-R, la couleur rouge donne l'étalement fréquentiel de la bande GSM-P (GSM Public) et la couleur verte donne l'étalement fréquentiel de la bande GSM-E « Extended GSM ».

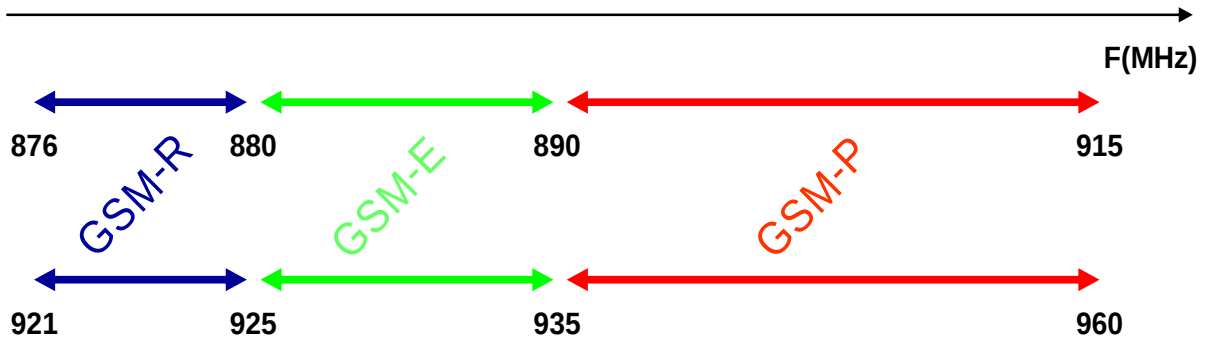


Fig. 1. 5. Bandes de fréquences allouées au voisinage de la bande GSM-R

Chaque bande de fréquence allouée au système GSM-R a été divisée en 20 sous-bandes de 200 kHz. Seuls 18 de ces 20 canaux sont utilisés afin d'éviter les interférences avec le système GSM Etendu.

Ce système est également un système TDMA (Time Division Multiple Acces). Sur chaque canal de communication, l'information est transmise par trames TDMA périodiques de période de 4.615 ms. Chaque trame TDMA est découpée en 8 intervalles de temps appelés « Time Slot » de 577 μ s. Le contenu du « Time Slot » est appelé « Burst », composé de 156 bits de 3.7 μ s de durée, tel que le montre la Fig. 1. 6.

Chaque utilisateur occupe, à plein débit, le canal de communication pendant 577 μ s avec une période de 4.615 ms comme le montre la Fig. 1. 7. Ce système permet donc le partage d'un canal fréquentiel par au moins 8 utilisateurs en simultané.

Le système GSM-R utilise des codes correcteurs d'erreurs [I-6] et le protocole spécifique Euroradio [I-7] qui lui donnent le pouvoir de corriger certaines trames erronées (code canal) ou de réémettre l'information jusqu'à sa bonne réception.

Les différents codes correcteurs permettent au système GSM-R de corriger quelques bits erronés sur une trame reçue. Ainsi, quelques trames erronées ne sont pas rejetées automatiquement et leur correction permet de résister à quelques types de perturbations électromagnétiques.

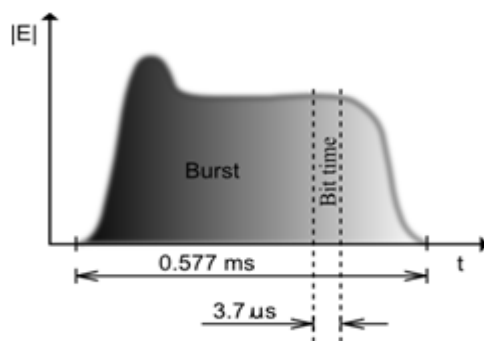


Fig. 1. 6. Caractéristiques temporelles d'un Burst GSM-R

Si les codes correcteurs n'arrivent pas à corriger la trame reçue, le protocole Euroradio permet de réémettre cette trame à plusieurs reprises jusqu'à la bonne réception de la trame.

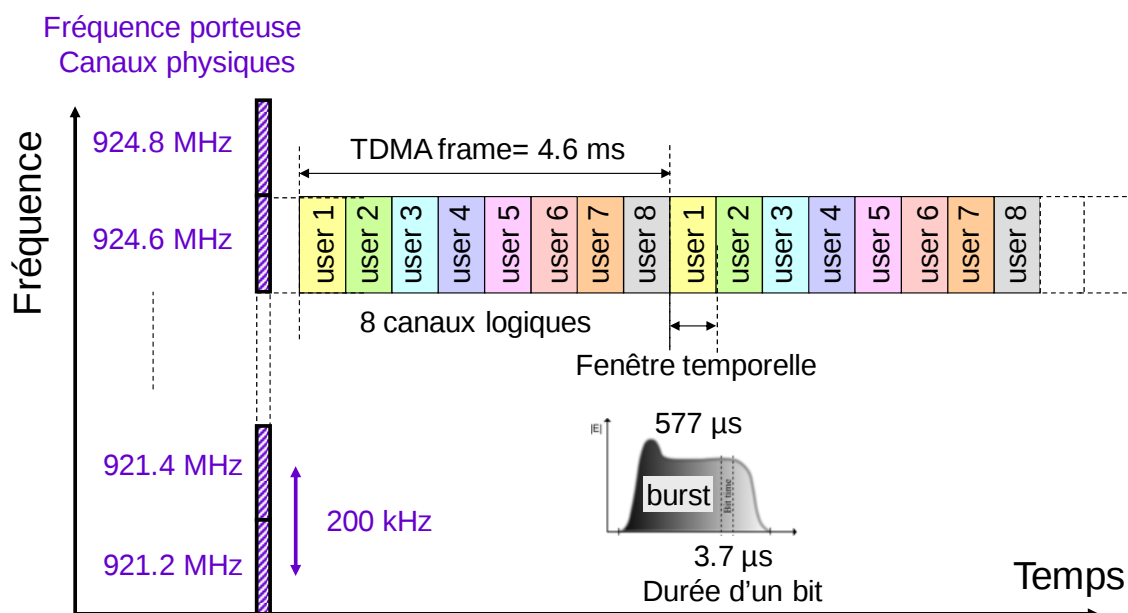


Fig. 1. 7. Partage des canaux GSM-R selon le mode d'accès TDMA

Ces caractéristiques montrent donc que le système Euroradio peut être robuste face aux perturbations EM transitoires sur son canal de propagation.

La continuité du service GSM-R est essentielle pour le bon fonctionnement du système ETCS et donc pour la sécurité du réseau ferroviaire en Europe. Dans les projets MORANE et EIREINE [I-8, I-9], des exigences ont été définies afin d'assurer un déploiement du système GSM-R permettant le fonctionnement correct du système Euroradio.

Une partie du système GSM-R étant embarquée, on peut s'interroger sur les tolérances du système GSM-R face aux perturbations EM présentes à bord d'un train en mouvement et les déformations que peuvent subir les signaux utiles véhiculés à travers ce système. Ce travail fait l'objet de cette thèse.

Néanmoins, nous n'avons pas étudié l'effet des perturbations EM sur les composants électroniques du système GSM-R car nous considérons que cet aspect est déjà couvert par les tests d'immunité que les équipements embarqués doivent subir.

Nous nous sommes focalisés sur les perturbations EM que subissent les signaux de communication dans cet environnement électromagnétique et sur la façon dont les systèmes traitent les dégradations du signal. Bien évidemment, une parfaite connaissance des perturbations reçues par le système GSM-R est nécessaire.

Pour ce faire, il convient de caractériser les perturbations électromagnétiques observées au sein de l'environnement ferroviaire et réceptionnées par les antennes d'émission - réception de ces nouveaux systèmes de communication utilisés pour la gestion du trafic ferroviaire.

Dans la partie suivante, nous introduirons les différentes perturbations EM susceptibles d'être rencontrées au sein de l'environnement ferroviaire.

III. PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES RENCONTREES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

D'un point de vue électromagnétique, une installation ferroviaire électrique est une structure complexe composée de plusieurs systèmes tels que les trains (matériel roulant), les installations électriques (caténaires, sous-stations...), les systèmes de télécommunication et les systèmes de contrôle. La cohabitation au sein de l'environnement ferroviaire de systèmes fonctionnant sur des fortes puissances et des systèmes de communication et de contrôle-commande véhiculant des signaux utiles de faible tension, rend ce milieu très sujet à des problèmes de CEM. En outre, ces systèmes sont dans plusieurs cas très proches les uns des autres et les mécanismes de couplages entre ces systèmes peuvent être multiples et variés. Toutes les perturbations électromagnétiques générées par les éléments précités sont intrinsèques à l'environnement ferroviaire.

Par ailleurs, les équipements ferroviaires peuvent également être soumis à des perturbations électromagnétiques extérieures à l'environnement ferroviaire, notamment à proximité des émetteurs de signaux RF situés dans le voisinage de l'infrastructure ferroviaire.

Naturellement, on peut penser que les limites géographiques de l'infrastructure ferroviaire sont définies par les limites spatiales des composants de l'infrastructure ferroviaire (gares, sous-stations, poteaux de caténaires...) ou par les clôtures murales ou métalliques grillagées disposées le long des voies ferrées. Les normes CEM relatives au domaine ferroviaire, qui seront présentées en détail dans la partie suivante, définissent par défaut les limites géographiques de l'environnement ferroviaire à 10 m de part et d'autre de l'axe central des voies ferrées ou à 3 m des murs des sous-stations. Cette limite géographique définie par les normes peut être justifiée dans l'environnement rural mais reste discutable dans le domaine urbain.

Partant du principe que chaque câble, composant, circuit ou système électrique ou électronique parcouru par un courant électrique peut être une source de perturbation électromagnétique pour tout système situé dans son voisinage, on peut supposer que le système ferroviaire est un environnement riche en sources de perturbations électromagnétiques.

1. Perturbations EM issues du matériel roulant

Au niveau du matériel roulant, les composants et systèmes électroniques de puissance au travers desquels les moteurs électriques des trains sont alimentés, utilisent des composants électriques et électroniques (diodes, thyristors, transistors, dispositifs de commande des thyristors et transistors, des commutateurs...etc) qui fonctionnent à des fréquences largement supérieures à 50 Hz et peuvent eux aussi générer des perturbations électromagnétiques sur des fréquences qui peuvent atteindre plusieurs kHz. Ce cas est souvent observé sur les hacheurs

qui contrôlent les moteurs à courant continu ou les circuits de commutation employés par les inverseurs qui contrôlent les moteurs asynchrones [I-10]. Au sein du matériel roulant, des bruits électromagnétiques peuvent être générés lors des variations rapides de courant et de tension au moment des freinages par exemple. Les transistors de type IGBT, qui sont aussi utilisés au sein du matériel roulant, peuvent générer des perturbations électromagnétiques qui peuvent atteindre quelques MHz.

Les machines électriques utilisées dans le domaine ferroviaire, peuvent générer lors de leurs fonctionnements des perturbations électromagnétiques égales ou proportionnelles à leurs vitesses de rotation (vitesse de rotation du rotor qui peut être aussi appelé induit dans le cas des moteurs à courant continu). De plus, les moteurs électriques sont considérés comme des charges qui consomment une forte puissance réactive. La présence des charges réactives sur les réseaux ferroviaires est souvent source de courant harmonique sur le réseau électrique. Ces courants génèrent des perturbations EM à des fréquences égales aux fréquences des courants qu'ils injectent sur le réseau. Généralement, ces courants génèrent des perturbations EM sur des fréquences ne dépassant pas quelques kHz.

2. Perturbations EM provenant de l'infrastructure d'alimentation électrique

Le premier composant de l'infrastructure d'alimentation ferroviaire auquel on pense est la caténaire sur laquelle circule un courant élevé, qui peut être considérée comme un câble électrique alimenté par les sous-stations et sur lequel est branchée une charge mobile à forte dynamique (le train) [I-11] qui demande une grande puissance réactive. Le rail utilisé comme un conducteur pour les courants de retour, peut aussi présenter une source de rayonnement EM sur les bandes de fréquence couvertes par les courants harmoniques.

La caténaire, qui a un comportement fortement inductif, [I-12] peut non seulement causer des chutes élevées de la tension d'alimentation du train le long de son parcours mais peut aussi être une source de rayonnement de perturbations électromagnétiques importantes. De plus, dans le cas des alimentations électriques fonctionnant à 25 000 V AC 50 Hz, les trains sont généralement équipés d'électronique de puissance (transformateurs, redresseurs, hacheurs...). Ces dispositifs sont connus pour causer des problèmes de pollution des réseaux électriques, en injectant des courants harmoniques sur le réseau d'alimentation et les caténaires, et par voie de conséquence, les caténaires et les rails peuvent émettre ces perturbations électromagnétiques à des fréquences supérieures à 50 Hz et pouvant aller jusqu'à quelques kHz [I-10]. Ceci peut devenir pénalisant lorsque la fréquence des courants harmoniques peut atteindre les fréquences de résonance des caténaires. Pour limiter ce phénomène, on utilise généralement un ensemble de filtres adéquats (utilisant principalement la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)) [I-13] afin d'éliminer ces courants parasites, mais ces solutions restent encore chères et complexes de réalisation.

Concernant les sous stations, qui comportent principalement des transformateurs, les perturbations EM qui peuvent être générées sont semblables, en termes de bandes de fréquence, à celles observées à bord des trains et ne dépassent pas quelques kHz.

De plus, il faut préciser que les opérations de commutation au niveau des commutateurs « switches » utilisés dans les sous stations et à bord des trains peuvent générer des perturbations électromagnétiques transitoires rapides et donc large bande qui peuvent atteindre quelques MHz [I-14] et dans quelques cas les fréquences UHF [I-15].

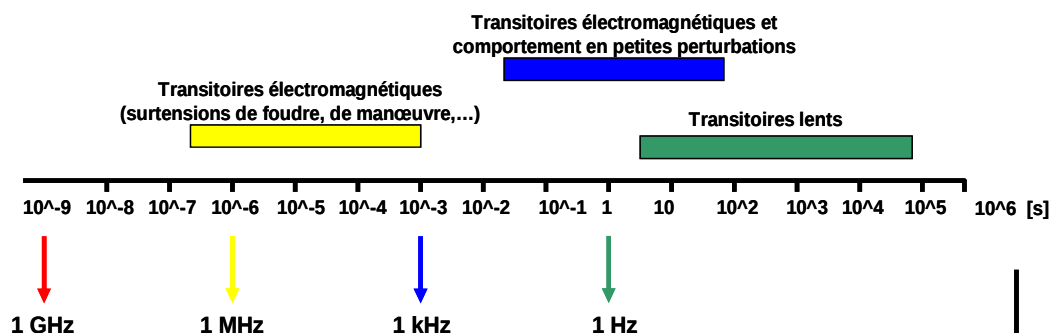


Fig. 1. 8. Bandes de fréquence de couverture des perturbations EM transitoires rencontrées dans les installations électriques de puissance

La Fig. 1. 8. résume les bandes de fréquences couvertes par les phénomènes transitoires rencontrés dans toute installation électrique associant des composants d'électronique de puissance, transformateurs... [I-16]

La Fig. 1. 8. montre que les perturbations électromagnétiques transitoires rencontrées au sein d'une installation électrique génèrent des champs électromagnétiques qui couvrent des bandes de fréquences qui peuvent atteindre quelques MHz.

3. Perturbations EM issues des événements EM transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe

Outre les perturbations transitoires observées au niveau des systèmes électroniques de puissance, des transitoires rapides peuvent apparaître entre la caténaire et le pantographe lors d'un mauvais contact entre eux. Parfois, ces transitoires peuvent être observés à l'œil nu sous forme d'arcs électriques qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe en particulier la nuit et en période de gel.

En effet, le captage de courant est assuré durant le trajet par un contact glissant entre la caténaire et le pantographe. L'adhérence de ces deux composants durant le parcours du train peut sur quelques points du trajet devenir faible et on observe ainsi un décollement entre la caténaire et le pantographe.

A ce moment, une chute de courant très rapide apparaît au niveau de « l'air gap » qui se crée entre deux points de potentiels différents (caténaire et pantographe), telle que le montre la Fig. 1. 9. Cette chute rapide de potentiel est à l'origine d'un bruit électromagnétique transitoire rapide [I-17]. Comme cela a été précisé au-dessus, ces perturbations transitoires peuvent couvrir des fréquences très hautes qui atteignent les bandes de fréquence UHF, donc supérieures à 300 MHz.

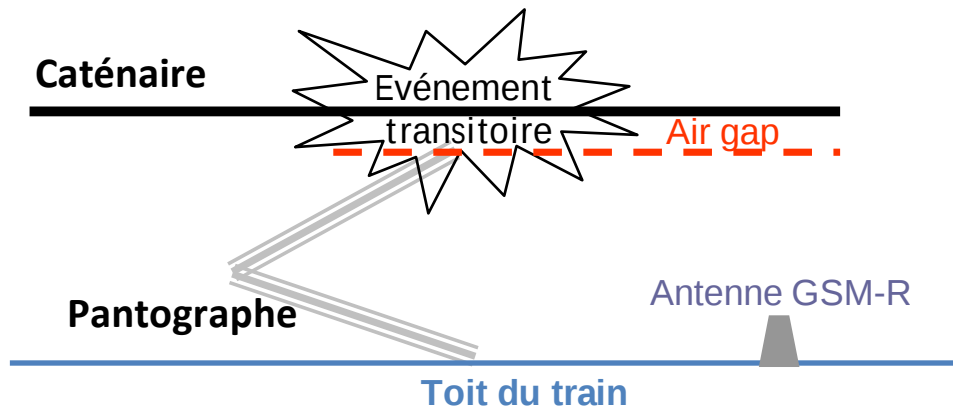


Fig. 1. 9. Mécanisme d'apparition d'un événement transitoire entre la caténaire et le pantographe

Le phénomène de décollement de la caténaire du pantographe est généralement corrigé par des systèmes mécaniques (vérins pneumatiques) qui permettent de surélever le pantographe pour le recoller à la caténaire. Malheureusement, le temps de réaction des vérins mécaniques est généralement plus long que la durée des phénomènes transitoires, leur apparition est donc inévitable.

Ces transitoires peuvent générer des perturbations électromagnétiques large spectre [I-18] et se produisent aléatoirement. [I-17]. Il a été observé que les perturbations EM transitoires produites au niveau des pantographes peuvent être détectées à 120 mètres du train dans la bande VHF [I-19]. Sachant que les antennes GSM-R sont généralement fixées au-dessus de la locomotive, donc à proximité du pantographe, on peut intuitivement penser que ces antennes GSM-R peuvent subir des amplitudes très élevées de champ électromagnétique lors de l'apparition de ces phénomènes. Ces événements transitoires nécessitent donc une attention particulière puisqu'ils peuvent être pénalisants pour le bon fonctionnement du système GSM-R.

On verra dans la suite de la thèse que ces phénomènes transitoires sont les perturbations EM qui risquent le plus de perturber le système GSM-R.

4. Perturbations EM externes au domaine ferroviaire

Dans le passé, l'environnement ferroviaire ne comportait pas de système de télécommunication sensible embarqué à bord des trains et on ne s'intéressait donc pas aux perturbations EM externes à l'environnement ferroviaire, et généralement cet environnement était considéré comme une source de perturbations EM pour les structures et installations qui lui sont voisines et non l'inverse.

Depuis l'intégration récente de plusieurs systèmes sensibles, tels que le système GSM-R, le WiFi, Bluetooth..., on commence à se demander si ces systèmes peuvent être gênés par la pollution EM urbaine.

Hormis des phénomènes très ponctuels tels que la foudre ou certaines installations industrielles employant des puissances très élevées, les principales sources de perturbations EM externes au domaine ferroviaire sont les émissions électromagnétiques volontaires (émetteurs de radio, émetteurs de télévision, téléphones mobiles, radars...) qui peuvent perturber les systèmes d'information et de communication à bord des trains, dès lors que les canaux de fréquences employés sont proches ou identiques.

Ces risques sont plus fréquents en environnement urbain. La densité de population élevée dans ces zones ainsi que le grand nombre d'émetteurs font que plusieurs canaux de communication sont exploités, et les risques d'interférences sur les communications employées à bord des trains sont très importants. Sous ces conditions, les amplitudes de bruit EM qui peuvent être observées sur les canaux employés par les systèmes embarqués sont susceptibles d'être très élevées.

IV. NORMES CEM RELATIVES AU DOMAINE FERROVIAIRE

1. Description des normes 50121

1.1. Objectifs des normes

Au niveau européen, le contrôle des émissions et de l'immunité électromagnétique dans le domaine ferroviaire est soumis à la série des normes EN 50121 [I-20]. Ces normes décrivent les tests à réaliser sur les équipements, les véhicules et l'infrastructure ferroviaire afin de contrôler leur compatibilité électromagnétique et définissent les niveaux d'émission et d'immunité électromagnétique à respecter.

Cette série de normes comportent cinq parties

- La norme 50121-1 : Généralités :
Elle décrit le comportement électromagnétique du système ferroviaire
- La norme 50121-2 : Emission du système ferroviaire dans son ensemble vers le monde extérieur :
Elle définit les limites d'émission du système ferroviaire vers le monde extérieur, en décrivant les méthodes d'essais à réaliser et les valeurs limites autorisées de bruits électromagnétiques générés sur l'environnement extérieur.
- La norme 50121-3 : Matériel roulant :
Elle est divisée en deux parties. La première partie présente les limites d'émissions de tout type de matériel roulant, et la deuxième partie décrit les limites d'émission de chaque élément électrique ou électronique destinés à équiper les matériels roulants.
- La norme 50121-4 : Emission et immunité des appareils de signalisation et de télécommunication :
Elle définit les limites d'émission et d'immunité électromagnétique des appareils de signalisation et de télécommunication dans le domaine ferroviaire et décrit les tests à réaliser pour évaluer les problèmes CEM liés à ces systèmes de signalisation.
- La norme 50121-5 : Emission et immunité des installations fixes d'alimentation de puissance et des équipements associés :
Elle définit les limites d'émission et d'immunité électromagnétique des installations fixes. Les tests CEM relatifs à ces installations sont aussi décrits dans cette partie.

Notre objectif étant d'estimer les perturbations électromagnétiques que peuvent subir les systèmes embarqués à bord des trains, on peut penser utiliser les limites d'émission électromagnétique autorisées par les normes EN 50121 pour nous donner une idée sur les niveaux de perturbations que peuvent subir ces systèmes de télécommunication embarqués.

1.2. Caractérisation EM des émissions rayonnées par le système ferroviaire selon la norme EN 50121

Les émissions EM des équipements embarqués sont contrôlées en laboratoire et sont couvertes par la section 3 de la norme EN 50121. Le contrôle des émissions du système ferroviaire dans son ensemble consiste généralement à vérifier les émissions EM à 10 mètres de l'axe central des voies ferrées ou à 3 mètres des sous-stations et à une hauteur de 1 ou 3 mètres par rapport au niveau des voies ferrées. Un analyseur de spectre connecté à cette antenne permet de mesurer le bruit électromagnétique généré lors du passage d'un train devant le point de mesure.

Les normes donnent des limites d'émission EM dans le domaine fréquentiel sur une bande de fréquence allant de 9 kHz à 1 GHz. Cette large bande de fréquence est divisée en 3 sous-bandes de fréquence [9 kHz 150 kHz], [150 kHz 30 MHz] et [30 MHz 1 GHz]. Pour chaque sous bande de fréquence, la norme donne des précisions sur les paramètres de configuration de l'analyseur de spectre et la valeur limite de champ électromagnétique correspondante. Ces limites sont présentées sous forme d'abaques donnant l'amplitude de champ magnétique limite (en dB μ A/m) sur les bandes de fréquence allant de 9 kHz à 30 MHz et l'amplitude de champ électrique (en dB μ V/m) limite sur la bande de fréquence allant de 30 MHz à 1 GHz. (Fig. 2. 1.)

1.3. Références utilisées dans ces normes

Les normes EN 50121 sont généralement basées sur les méthodes de mesure définies par les normes du Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques CISPR 16 [I-21, I-22], CISPR 18 [I-23] et CISPR 22 [I-24].

Les normes CISPR sont initialement pensées pour la protection des systèmes analogiques, c'est-à-dire que les méthodes de mesure des perturbations EM préconisées par ces standards ont été adaptées à une mesure de bruit électromagnétique permettant d'obtenir une image du bruit EM tel que le voient les systèmes analogiques.

A titre d'exemple, les largeurs des bandes de résolution définies dans ces normes, correspondent généralement à la largeur des filtres d'entrée des systèmes de communication analogiques. L'immunité d'un système analogique est vérifiée en faisant le rapport entre le bruit recueilli et le niveau de couverture du signal utile, soit le rapport signal à bruit (SNR). En revanche, le système GSM-R utilise des protocoles élaborés qui lui permettent notamment de rectifier des données binaires erronées... De ce fait, il est possible que l'analyse des perturbations EM environnantes doive se faire d'une manière différente par rapport aux systèmes analogiques.

2. Besoins normatifs pour protéger les nouveaux systèmes de gestion de trafic

Malheureusement, les limites d'émission en champ électromagnétique qui sont données dans les différentes parties de la norme EN 50121 ne peuvent fournir aucune indication sur les

amplitudes de champ électromagnétique que risquent de subir les systèmes embarqués à bord du train. En effet, les amplitudes de champ électromagnétique considérées dans ces normes correspondent principalement aux niveaux de bruit électromagnétique que génère l'environnement ferroviaire sur son voisinage et ne donnent aucune indication sur le bruit électromagnétique présent au niveau des antennes des systèmes de communication embarqués à bord du matériel roulant, par exemple sur le toit de la locomotive.

Les nouveaux systèmes embarqués pour la gestion du trafic ferroviaire fonctionnent désormais sur des bandes de fréquence plus élevées par rapport aux anciens systèmes analogiques que les standards EN 50121 visent à protéger. Le système GSM-R fonctionne sur des fréquences proches de 1 GHz alors que le système RST utilise une bande de fréquence proche des 470 MHz. Cette augmentation de fréquence, introduit de nouveaux problèmes de compatibilité électromagnétique.

En effet, à des fréquences élevées, la position de l'antenne par rapport à la source d'émission influe davantage sur l'amplitude de l'onde électromagnétique mesurée. Ainsi, les niveaux de bruit EM mesurés à 10 mètres des voies, comme le préconisent les normes EN 50121, peuvent être très différents de ce qu'il est possible de mesurer sur une antenne embarquée.

Comme cela a été dit précédemment, les méthodes de mesures employées dans les normes EN 50121 s'inspirent de méthodes de mesure des champs radioélectriques décrites dans les normes CISPR 16, CISPR 18 et CISPR 22. Ces normes décrivent généralement des protocoles de mesures adaptés au contexte des systèmes électriques/électroniques analogiques et ne sont pas nécessairement adaptées au contexte des systèmes numériques.

De ce fait, les normes EN 50121 ne sont pas adéquates à la protection des systèmes numériques intégrés au sein de l'environnement ferroviaire et fonctionnant sur des bandes de fréquences élevées, tels que le système GSM-R qui nous intéresse dans le cadre de ce travail et qui fonctionne sur des bandes de fréquence proche de 1 GHz.

En conclusion, les normes EN 50121 ne permettent pas de déterminer de façon complète le champ électromagnétique observé au niveau des antennes d'émission/réception des systèmes embarqués à bord des trains.

Dans ce contexte, il convient de développer de nouvelles méthodes de caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des nouveaux systèmes de télécommunication numériques embarqués à bord des trains et déployés le long de l'infrastructure.

Les nouvelles méthodes doivent permettre de caractériser l'environnement électromagnétique ferroviaire à l'endroit des antennes d'émission-réception de ces systèmes embarqués afin de permettre d'étudier l'immunité des systèmes numériques de télécommunication embarqués face aux perturbations de toutes natures, notamment les perturbations transitoires rencontrées à bord des trains.

V. COMMENT ASSURER LA CEM DU SYSTEME GSM-R AU SEIN DU MILIEU FERROVIAIRE

Face à l'importance du rôle du système GSM-R dans le futur réseau ferré européen, son immunité face aux perturbations EM rencontrées au sein de l'environnement EM ferroviaire doit être rigoureusement vérifiée. Etant données les particularités de fonctionnement du système GSM-R par rapport aux systèmes analogiques, il est peu approprié de mener des essais selon des méthodes de tests traditionnelles qui sont mal adaptées à ce type de système et qui ne permettent pas d'aboutir à des données représentatives des contraintes électromagnétiques les plus néfastes.

Afin de développer une méthode efficace en vue d'assurer la CEM entre le système GSM-R et le milieu ferroviaire il convient dans un premier temps d'identifier les sources de perturbations EM qui risquent d'être les plus pénalisantes pour les transmissions GSM-R puis de caractériser les bruits EM provoquant des erreurs non corrigées dans les données.

L'identification et la caractérisation de ces perturbations EM permettra d'adapter les méthodes développées pour contrôler l'immunité de ce système embarqué.

1. Développement d'une méthodologie de caractérisation des perturbations EM reçues par les antennes GSM-R

L'étude de ces perturbations vise à donner des résultats exploitables permettant de tester l'immunité du système GSM-R face aux conditions réelles qu'il peut rencontrer à bord d'un train en mouvement. Il faudra donc caractériser le bruit EM à l'endroit de fixation des antennes GSM-R.

Par ailleurs, les sources de perturbations électromagnétiques qui peuvent affecter les signaux utiles du système GSM-R sont celles qui peuvent couvrir les fréquences utilisées par le GSM-R. On peut citer :

- Les perturbations EM émises par les antennes relais du réseau GSM public qui peuvent émettre sur des canaux adjacents aux canaux du système GSM-R et causer des problèmes d'interférence sur le système GSM-R.
- Les événements EM transitoires qui trouvent leurs sources entre la caténaire et le pantographe lors d'un mauvais contact entre ces deux composants. Ces événements EM générés sont courts en temps, donc large bande dans le domaine fréquentiel et apparaissent à proximité des antennes GSM-R.

Grâce aux bandes de garde souvent prises en compte pour éviter les problèmes d'interférences EM générées par le système GSM public, les interférences entre ces deux systèmes devraient être limitées. En revanche, les perturbations EM transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe sont des phénomènes large bande qui peuvent couvrir les bandes de fonctionnement du système GSM-R et peuvent générer des amplitudes de perturbation assez élevées par rapport aux niveaux de couvertures du système GSM-R.

Face à des perturbations EM de ce type, une caractérisation dans le domaine temporel semble plus appropriée qu'une caractérisation dans le domaine fréquentiel. Les différentes méthodes de caractérisation seront présentées dans le prochain chapitre de la thèse.

2. Adapter les méthodes de test d'immunité pour les systèmes numériques embarqués

Initialement, la « Radio Sol Train » assurait uniquement la transmission de la voix entre les conducteurs et les centres de régulation de trafic. Ainsi, dès lors que des perturbations EM survenaient, cela se traduisait par une dégradation de la compréhension du message et le conducteur pouvait réagir en renouvelant l'appel ou en demandant à son interlocuteur de répéter.

Désormais, le système GSM-R devra non seulement assurer la transmission de la voix mais également la transmission des données de signalisation et de contrôle-commande. Pour ces données, le conducteur devra faire totalement confiance à la fiabilité du système de transmission car il n'aura aucun moyen de détecter l'effet éventuel de perturbations EM sur l'intégrité des données transmises. C'est pour cette raison que ce système exige une étude en immunité EM amont et rigoureuse, garantissant la fiabilité du système au sein de l'environnement EM ferroviaire. Il faut donc mener des essais face à des bruits EM représentatifs des conditions réelles et qui ne sont pas nécessairement reproduites dans les différentes méthodes de test standardisées.

De plus, le système GSM-R est un dispositif numérique employant le mode d'accès TDMA et qui possède un pouvoir de correction. Alors, pour mener des essais d'immunité adaptés à ce type de système, il faut considérer toutes ces caractéristiques qui le distinguent des systèmes analogiques et qui peuvent agir sur sa tolérance aux perturbations EM. Il faut par conséquent employer des critères d'immunité adaptés à ce type de système et fixer les limites d'immunité en fonction des exigences de qualité de service attendues dans le milieu ferroviaire. En effet, on ne peut pas analyser la qualité de transmission d'un système numérique de la même manière qu'un système analogique et ignorer les capacités de correction d'erreurs de ces dispositifs.

Chapitre 2

Caractérisation de l'Environnement Electromagnétique Ferroviaire

Résumé : Ce chapitre décrit la caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire. Après une description des méthodes couramment utilisées en CEM pour caractériser un environnement électromagnétique, nous décrirons la mise en œuvre et le test de ces méthodes à bord d'un train en mouvement. La troisième partie compare les résultats obtenus à l'aide de deux méthodes avant de donner une critique de leur pertinence en vue d'une étude de l'immunité du système GSM-R face aux contraintes imposées par son environnement. Le dernier paragraphe propose une nouvelle approche adaptée à ces systèmes et permettant une étude pointue sur les différentes caractéristiques des bruits EM qui peuvent avoir une influence sur la qualité des communications du système GSM-R.

Sommaire :

I. CARACTERISATION DES ENVIRONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES.....	31
II. MISE EN ŒUVRE DES METHODES DE CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT ET POST- TRAITEMENTS ASSOCIES.....	43
III. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR LES DEUX METHODES DE CARACTERISATION	70
IV. ANALYSE ET CRITIQUE DE CES RESULTATS POUR ETUDIER L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R PAR RAPPORT A CET ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE	78
V. NOUVELLE APPROCHE PERMETTANT LA CARACTERISATION DU BRUIT EM TRANSITOIRE EN VUE D'ETUDIER L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R.....	81

I. CARACTERISATION DES ENVIRONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Vue l'importance des fonctions assurées par le système GSM-R pour la sécurité et l'optimisation du trafic ferroviaire, il est nécessaire de veiller au bon fonctionnement et à la fiabilité des différents organes de ces systèmes dans leur environnement, notamment l'immunité électromagnétique face aux perturbations électromagnétiques qu'ils peuvent rencontrer à bord d'un train. Les systèmes embarqués sont soumis à un environnement électromagnétique très particulier et leur fonctionnement peut être perturbé et par conséquent ils peuvent perdre leurs capacités à assurer les fonctions pour lesquelles ils sont utilisés. Ceci peut présenter un danger pour la fiabilité du système ferroviaire et la sécurité des voyageurs et du personnel.

La directive CEM introduite dans les années 90, définit des règles et des recommandations qui imposent l'étude de l'immunité électromagnétique des systèmes électroniques face aux perturbations EM qu'ils risquent de rencontrer dans leur environnement afin d'éviter tout problème sur leur fonctionnement.

Pour étudier l'immunité d'un système électronique face aux perturbations électromagnétiques qu'il peut rencontrer dans son environnement, la première étape consiste à connaître les différentes caractéristiques des perturbations EM rencontrées dans cet environnement électromagnétique (c'est la partie caractérisation d'environnement dans lequel on se place) et la deuxième étape est d'exposer le système à ces perturbations et observer son comportement. Au-delà des normes, l'immunité électromagnétique ne peut être validée que par le bon fonctionnement du système électronique face aux perturbations EM observées dans son environnement.

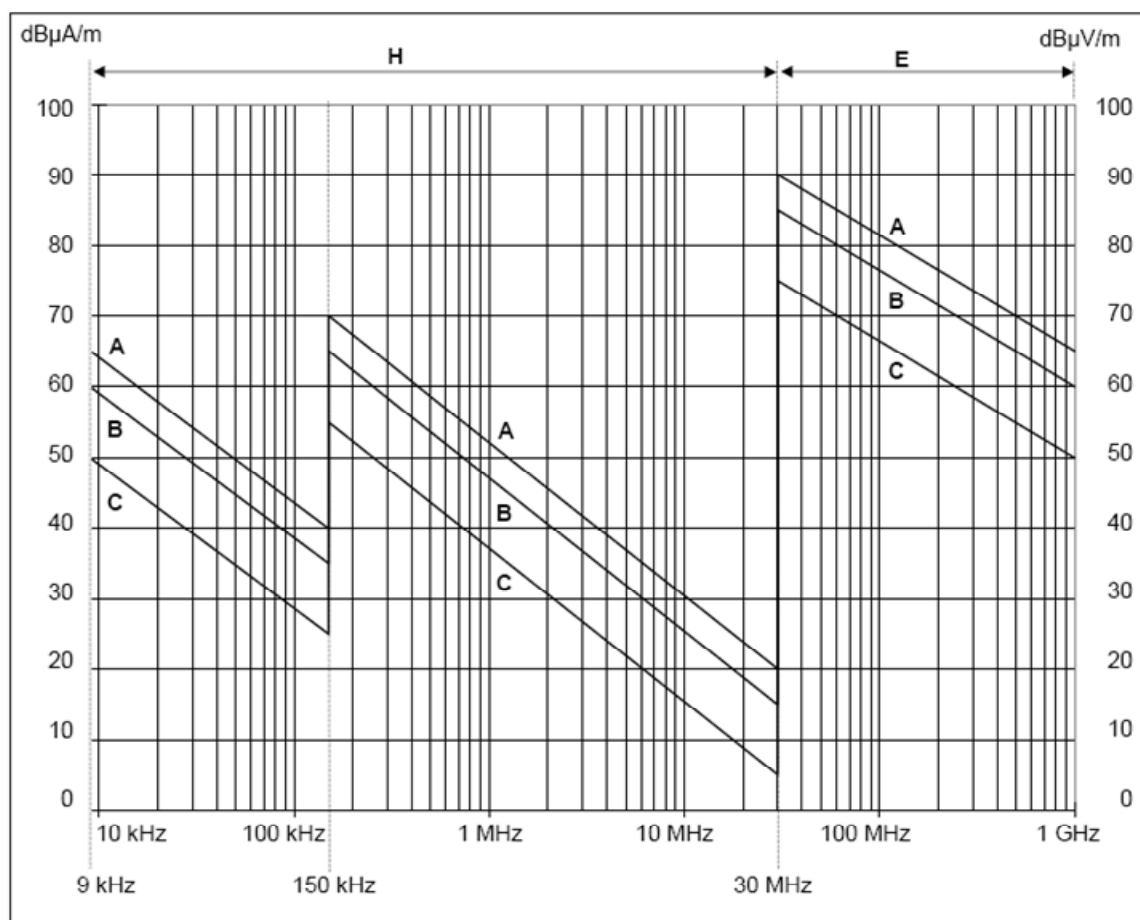
Une caractérisation exhaustive des perturbations EM observées par les systèmes embarqués à bord d'un train nécessite la mesure de ces perturbations EM à plusieurs endroits du train, puisque les antennes de ces systèmes de télécommunication sont désormais placées au-dessus, à l'intérieur ou en dessous du train.

Dans ce manuscrit on se focalisera principalement sur les perturbations EM observées par les antennes embarquées du système GSM-R sous des conditions d'opérations normales d'un train en mouvement

Dans le cas du système GSM-R, il faudrait connaître les bruits électromagnétiques qui viennent se superposer aux signaux utiles dans l'environnement ferroviaire, ce qui est souvent ardu. En effet, il est difficile d'évaluer avec précision les perturbations électromagnétiques qu'on peut rencontrer à l'endroit où se situent les antennes GSM-R embarquées à bord du train, vues la complexité et la multiplicité des systèmes électroniques et des sources de perturbations électromagnétiques intrinsèques et externes à l'environnement ferroviaire.

Généralement, on peut estimer les champs électromagnétiques provenant des sources de perturbations EM volontaires permanentes et de quelques sources de champs EM involontaires permanentes ou transitoires, internes ou externes à l'environnement ferroviaire.

Malheureusement il est très difficile de connaître toutes les perturbations électromagnétiques involontaires que les antennes du système GSM-R peuvent subir à leur endroit de fixation. Une des solutions permettant de déterminer les niveaux de champs EM limites que le système GSM-R peut rencontrer au sein de l'environnement ferroviaire, peut être d'utiliser les niveaux d'émissions EM limites autorisés par les normes CEM relatives au domaine ferroviaire. En effet, les normes CEM applicables au système ferroviaire, définissent des niveaux maximums d'émission électromagnétique sur la bande de fréquence 1 kHz – 1 GHz et on pourrait penser tester l'immunité des systèmes embarqués face à ces niveaux limites. Les niveaux de perturbation EM limites présentés dans la norme EN 50121 sont donnés par la Fig. 2. 1.



NOTE 1 Emission limits

A = 25 kV a.c.

B = 15 kV a.c., 3 kV d.c. & 1,5 kV d.c.

C = 750 V & 600 V d.c., including trams/trolleybuses for use in city streets

Fig. 2. 1. Niveaux d'émission EM donnés par la norme EN 50121 à 10 m de l'axe central des rails

Malheureusement, ceux-ci ne sont pas représentatifs des champs EM observés à bord du train, puisque ce sont les niveaux limites d'émissions électromagnétiques que génère le système

ferroviaire à 10 mètres de l'axe central des rails. Ils ne sont donc pas adaptés pour le test de l'immunité des systèmes embarqués à bord du train.

En particulier, dans le cas du système GSM-R, les perturbations EM les plus néfastes sont celles qui couvrent les fréquences des canaux de communication, soit les fréquences proches de 900 MHz. A ces fréquences, les niveaux varient très rapidement dans l'espace.

L'environnement ferroviaire est caractérisé par des perturbations EM permanentes, mais comporte aussi des perturbations EM transitoires. En effet, l'alimentation électrique du train est assurée par l'intermédiaire d'un contact glissant entre la caténaire et le pantographe, où des imperfections au niveau de ce contact peuvent apparaître et sous certaines conditions donner naissance à des perturbations EM transitoires le long du parcours du train.

Ces événements peuvent dans certains cas être concrétisés par des arcs électriques.

Le champ EM transitoire généré est un exemple de perturbation EM involontaire que les systèmes embarqués peuvent subir et qui doit être pris en compte lors des tests d'immunité EM des systèmes embarqués.

Il existe des normes CEM, telles que la norme EN 6000-4-4 permettant de tester l'immunité des systèmes électroniques face aux perturbations électromagnétiques transitoires.

Ces normes, qui seront décrites avec plus de détail dans le quatrième chapitre de ce manuscrit, définissent des signaux électromagnétiques transitoires de test face auxquels les systèmes électroniques doivent être exposés. L'immunité est conditionnée par le bon fonctionnement des systèmes électroniques testés, au cours et après leur exposition à ces signaux EM transitoires de test.

Malheureusement les caractéristiques temporelles des signaux EM transitoires de test définis dans ces normes ne sont pas nécessairement représentatives des signaux transitoires que les systèmes embarqués peuvent subir au sein de l'environnement ferroviaire. Cette partie sera présentée plus en détails dans la suite de ce travail.

Les systèmes embarqués subissent la résultante de la combinaison des perturbations EM permanentes et transitoires à l'endroit de fixation des antennes d'émission réception de ces systèmes de télécommunication. Les tests d'immunité doivent prendre en compte ces différents types de perturbations électromagnétiques. Pour ce faire, il faut au préalable caractériser l'environnement électromagnétique ferroviaire.

Malheureusement, à ce jour aucune méthode de mesure standardisée ne permet de caractériser le bruit électromagnétique présent au-dessus du train, à l'endroit de fixation des antennes des systèmes embarqués, bien que ce bruit puisse affecter les communications GSM-R.

Il est cependant nécessaire de tester ce système face aux sources de perturbations électromagnétiques qu'il subira et plus particulièrement sur sa bande de fréquence de fonctionnement.

Il faut donc développer des méthodes de mesure permettant de caractériser les bruits électromagnétiques permanents et transitoires vus par les systèmes embarqués, tels que le système GSM-R.

Les résultats qui peuvent être obtenus par ces méthodes pourront permettre d'appréhender les effets des perturbations EM observées dans cet environnement sur le bon fonctionnement du système GSM-R.

Généralement, la caractérisation de tout environnement électromagnétique peut être réalisée dans le domaine temporel à l'aide d'un oscilloscope ou dans le domaine fréquentiel à l'aide d'un analyseur de spectre. Chaque méthode de caractérisation sera décrite dans ce chapitre et leurs avantages et inconvénients seront présentés.

1. Caractérisation dans le domaine fréquentiel

1.1. Description

La caractérisation EM dans le domaine fréquentiel permet d'obtenir des amplitudes de champ électromagnétique en fonction de la fréquence.

Ce type de caractérisation requiert l'utilisation d'un analyseur de spectre connecté par l'intermédiaire d'un câble adapté à une antenne de mesure.

Les données obtenues lors de l'étape de mesure peuvent être stockées en utilisant un ordinateur qui communique avec l'analyseur de spectre via un bus GPIB par exemple.

La Fig. 2. 2. présente la configuration de mesure adaptée à une caractérisation dans le domaine fréquentiel.

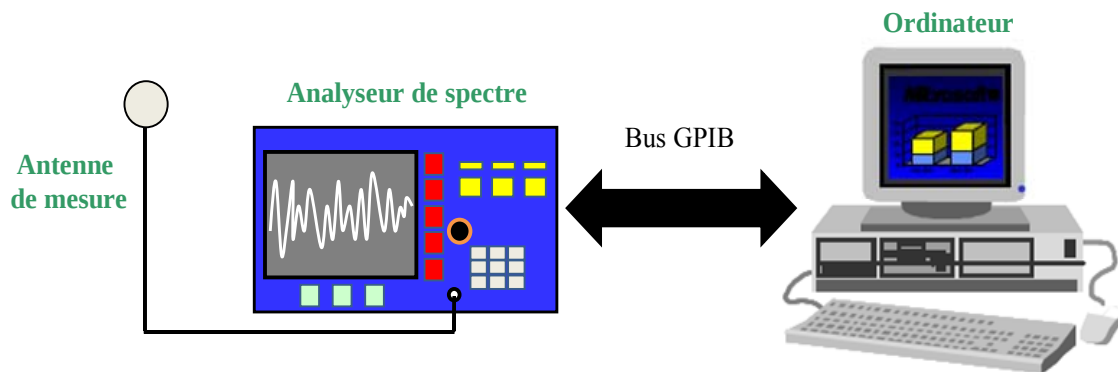


Fig. 2. 2. Configuration de mesure pour une caractérisation EM dans le domaine fréquentiel

Afin d'effectuer des mesures pertinentes à l'aide d'un analyseur de spectre, l'opérateur doit configurer un certain nombre de paramètres de mesure de l'analyseur.

Ces différents paramètres sont principalement :

- La bande de fréquence sur laquelle on veut caractériser l'environnement EM
- Le nombre de points de mesure sur la bande de fréquence explorée (résolution fréquentielle)

- La bande de résolution de l'analyseur, appelée en anglais « Resolution Bandwidth (RBW) » qui correspond généralement à la largeur fréquentielle d'un filtre glissant sur la bande de fréquence explorée. Pour chaque point de mesure, l'analyseur affiche sur son écran une image de l'énergie moyenne mesurée à la sortie de ce filtre. Généralement, plus la largeur du filtre est grande plus le niveau de bruit mesuré est élevé. Les normes relatives à la caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire définissent des valeurs de RBW pour chaque bande de fréquence exploitée.
- Le temps de balayage de l'analyseur, appelé en anglais « Sweep Time (ST) » qui correspond généralement au temps nécessaire au filtre glissant de l'analyseur de spectre pour balayer la totalité de la bande de fréquence de mesure. Dans notre cas, à la différence des autres paramètres de mesure de l'analyseur de spectre qui sont généralement fixés par l'opérateur, le temps de balayage va dépendre de l'ensemble des paramètres précités.
- Type de la valeur variable affichée (tension, courant ou puissance)
- Paramètres d'échelle (niveau maximum, échelle linéaire ou échelle logarithmique...)
- Détecteurs de mesure (Peak, quasi-peak,...) sont aussi définis par l'opérateur et permettent de définir la manière avec laquelle l'analyseur de spectre traite l'information mesurée avant de l'afficher sur son écran.

Chaque paramètre de l'analyseur a une influence non négligeable sur la mesure réalisée.

- La bande de fréquence balayée et le nombre de points impacteront la résolution fréquentielle de la mesure. Par exemple, plus le nombre de points de mesure est important, plus la résolution fréquentielle de la mesure est bonne.

- La bande de résolution de l'analyseur de spectre (RBW) pourra agir sur le niveau mesuré. En effet, pour chaque point de mesure l'analyseur fixe la fréquence centrale du filtre glissant à la fréquence de mesure et calcule l'énergie moyenne vue par le filtre à ce point de fréquence. Donc le niveau mesuré sur un point de fréquence va dépendre de cette bande de résolution.

- Une bande de résolution étroite peut entraîner un temps de balayage (ST) important. En effet, le temps de balayage est généralement calculé automatiquement par l'analyseur en fonction de la largeur de la bande de fréquence étudiée, ainsi que la largeur de la bande de résolution (RBW) définie.

Généralement, les normes permettant de caractériser des environnements électromagnétiques tels que l'environnement ferroviaire décrivent des procédures de caractérisation dans le domaine fréquentiel et donnent des recommandations sur les bandes de fréquence à tester ainsi que les bandes de résolution et les ST à utiliser lors de la mesure.

- La méthode de détection employée lors d'une caractérisation EM dans le domaine fréquentiel à l'aide d'un analyseur de spectre peut être effectuée par différentes techniques. Généralement, les normes CEM utilisent la méthode de détection « quasi-peak » ou « peak » pour la caractérisation des perturbations électromagnétiques [II-1].

Dans le cas où on veut caractériser les amplitudes maximales des perturbations électromagnétiques que le système GSM-R risque de rencontrer à bord d'un train en mouvement on utilisera le mode de détection « peak » avec l'emploi de la fonction « Maxhold ».

La fonction « Maxhold » permet à chaque nouveau balayage, de comparer point par point (on parle ici des points de fréquence qui constituent les spectres) le niveau de bruit EM maximal observé sur la totalité de la mesure et le niveau de bruit EM nouvellement mesuré.

La fonction « Maxhold » ne conserve que le niveau de bruit EM maximal mesuré pour chaque point fréquentiel de mesure.

Ainsi, la fonction « Maxhold » permet à l'analyseur de spectre d'afficher un spectre comportant l'amplitude maximale de bruit EM observée sur la durée de la mesure.

L'antenne de mesure utilisée est généralement une antenne standard, telles que les antennes biconiques, log-périodiques, cornets... dont la fonction de transfert est stable sur une large bande de fréquence et adaptée à la bande de fréquence sur laquelle on veut caractériser l'environnement EM.

Les normes CEM définissent généralement les niveaux de perturbations électromagnétiques en termes d'amplitude de champ magnétique (dB μ A/m) pour des fréquences inférieures à 30 MHz, et en termes de champ électrique (dB μ V/m) pour des fréquences supérieures à 30 MHz.

Les mesures réalisées à l'aide des analyseurs de spectre sont donc converties en valeurs de champs EM, en utilisant le facteur d'antenne des antennes utilisées lors de la mesure. Les facteurs d'antennes sont généralement fournis par les fabricants d'antennes et peuvent aussi être mesurés en laboratoire.

1.2. Avantages et inconvénients d'une caractérisation dans le domaine fréquentiel

1.2.1. Les avantages de la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel

La caractérisation électromagnétique dans le domaine fréquentiel est relativement simple à mettre en œuvre. Il suffit d'une antenne adaptée dans la bande de fréquence de mesure et d'un analyseur de spectre configuré correctement par rapport aux différentes caractéristiques (amplitude et fréquence) des bruits électromagnétiques à mesurer pour pouvoir caractériser un environnement EM.

La facilité de mise en œuvre de cette méthode la rend très intéressante, en particulier dans le cadre d'une méthode de caractérisation standardisée.

Généralement, les normes CEM permettant de caractériser des environnements électromagnétiques recommandent des méthodes de mesure dans le domaine fréquentiel. Ces

normes donnent des recommandations sur les paramètres de configuration de l'analyseur de spectre, les temps de mesure, des fréquences à tester...

Par ailleurs, les tests réalisés avec un analyseur de spectre configuré pour faire des mesures en « Maxhold » permettent d'obtenir une seule courbe donnant les niveaux maximum de bruit EM observés durant la totalité du test sur la bande de fréquence exploitée.

Les niveaux limites d'émission électromagnétique décrits dans les normes CEM sont présentés sous la forme d'abaques donnant les amplitudes de champs électromagnétiques en fonction de la fréquence. Ce qui permet de faire rapidement la comparaison entre les niveaux mesurés et les limites autorisées.

La caractérisation dans le domaine fréquentiel est très adaptée aux bruits électromagnétiques permanents, mais malheureusement on trouve quelques difficultés à utiliser cette méthode pour caractériser des environnements électromagnétiques comportant des événements EM transitoires. La partie suivante explique ce point plus en détail.

1.2.2. Les inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel

La caractérisation des environnements électromagnétiques avec une méthode fréquentielle présente quelques contraintes.

En effet, pour effectuer des mesures correctes avec un analyseur de spectre il faudrait que le champ électromagnétique mesuré soit invariant, sur toute la bande de fréquence exploitée, au moins sur la durée de balayage ST de l'analyseur de spectre.

Sachant que l'environnement ferroviaire est caractérisé par des événements transitoires très rapides, qui apparaissent lors d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe, il est généralement très difficile de mesurer avec un analyseur de spectre les bruits électromagnétiques émis lors de l'apparition de ces événements EM transitoires [II-2].

En effet, on verra par la suite que la durée de ces événements EM transitoires est très courte par rapport aux valeurs de ST définies par les normes CEM de caractérisation EM de l'environnement ferroviaire. Dans ce cas, sur une durée de balayage de la bande de fréquence de mesure, si un événement transitoire plus rapide que ST apparaît, seule une partie des composantes fréquentielles de cet événement sera mesurée par l'analyseur de spectre.

On pourrait alors penser réduire le ST de l'analyseur lors de la mesure pour essayer de s'approcher au maximum d'une durée comparable à celle des événements transitoires.

Le ST peut être réduit de deux manières :

- L'opérateur peut forcer la valeur de ST à une valeur plus petite que celle calculée automatiquement par l'analyseur de spectre, mais ceci peut introduire des erreurs sur la mesure effectuée par l'analyseur de spectre. En effet, comme cela a été dit précédemment, le changement de la valeur de ST manuellement peut causer un problème de calibration de l'analyseur de spectre.

- L'opérateur peut augmenter la largeur de la bande de résolution (RBW) de l'analyseur de spectre, mais ceci entraînera automatiquement une augmentation des amplitudes du bruit électromagnétique affichées par l'analyseur de spectre.

Mais dans les deux cas, on notera que les ST minimums que peuvent offrir les analyseurs de spectres actuels sont toujours plus grands que la durée des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement

Pour pouvoir caractériser des environnements électromagnétiques comportant des événements transitoires rapides, il faut utiliser une méthode de caractérisation EM basée sur des mesures dans le domaine temporel. Cette méthode est décrite dans la partie suivante.

2. Caractérisation dans le domaine temporel

2.1. Description de la méthode employée pour une caractérisation dans le domaine temporel

La caractérisation d'un environnement électromagnétique dans le domaine temporel est généralement réalisée à l'aide d'un oscilloscope numérique connecté via un câble adapté à une antenne de mesure. Ce type de caractérisation permet la mesure des niveaux de bruit électromagnétique en fonction du temps et d'enregistrer les formes temporelles des signaux électromagnétiques observés dans cet environnement.

Les signaux mesurés sont généralement stockés dans le disque dur interne de l'oscilloscope numérique ou à l'aide d'un ordinateur qui communique avec l'oscilloscope par l'intermédiaire d'un bus GPIB.

Les signaux enregistrés peuvent être utilisés pour un post traitement.

L'oscilloscope numérique fonctionne comme un système d'acquisition de données. Le signal mesuré est amplifié et traité par un convertisseur analogique numérique avant d'être stocké sous forme de MOT binaires. Fig. 2. 3.

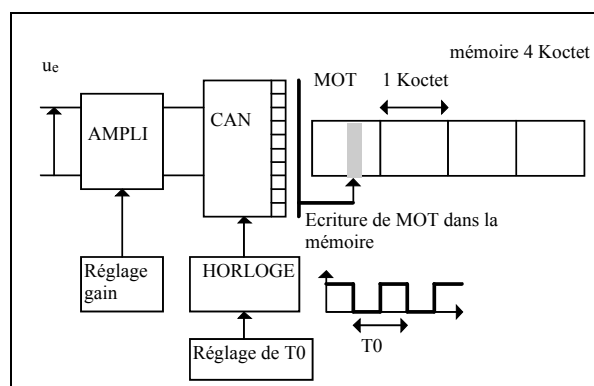


Fig. 2. 3. Traitement du signal mesuré au sein d'un oscilloscope numérique

Le convertisseur utilise en entrée un signal analogique mesuré et un signal d'horloge de fréquence F_e , appelée fréquence d'échantillonnage. Pour chaque front descendant du signal d'horloge, le convertisseur effectue une conversion analogique numérique du signal mesuré.

On dispose ainsi d'une image du signal mesuré toutes les $1/F_e$ secondes.

Cependant, la mémoire des oscilloscopes numériques étant limitée, il est impossible d'enregistrer les signaux observés en continu et sur des durées importantes.

Pour s'affranchir de cette limite de mémoire, lors d'une caractérisation dans le domaine temporel on mesure les perturbations électromagnétiques dont l'amplitude est supérieure au niveau de bruit EM permanent observé au sein de l'environnement à caractériser.

Généralement, l'opérateur joue sur un paramètre de l'oscilloscope appelé « Trig Level » qu'il fixe arbitrairement à un niveau légèrement supérieur au niveau de bruit EM permanent observé lors de la mesure. L'oscilloscope utilise ce niveau comme une valeur de déclenchement à partir de laquelle il enregistre le signal observé lorsque son amplitude est supérieure à cette valeur de « Trig ».

Le signal observé est enregistré sur une durée temporelle appelée « Time Window » définie elle aussi par l'opérateur. Cependant, la durée temporelle de la fenêtre enregistrée dépend de deux paramètres :

- La profondeur de mémoire de l'oscilloscope qui limite la durée temporelle de la fenêtre enregistrée.
- La fréquence d'échantillonnage utilisée. En effet, plus la fréquence d'échantillonnage est élevée plus la durée de la fenêtre d'enregistrement est petite, puisque la profondeur de mémoire de l'oscilloscope est généralement fixe.

Des mesures pertinentes réalisées avec un oscilloscope numérique sont conditionnées par une bonne configuration des paramètres de mesure de l'oscilloscope.

Quatre paramètres principaux doivent généralement être définis par l'utilisateur pour la configuration de l'oscilloscope :

- La fréquence d'échantillonnage doit satisfaire les conditions du théorème de « Nyquist-Shannon » qui conditionne la bonne représentation d'un signal analogique par un signal échantillonné par l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage supérieure ou égale au double de la fréquence maximale $F_{\max}$ contenue dans ce signal. Cette fréquence est appelée la fréquence de Nyquist-Shannon F_N .

Malheureusement, sous cette condition, le signal échantillonné ne comporte pas toute l'information contenue dans le signal d'origine.

Quelques applications de caractérisation dans le domaine temporel nécessitent l'utilisation d'une fréquence d'échantillonnage largement supérieure à cette fréquence de Nyquist. On verra dans la suite de nos travaux, que pour quelques applications particulières nécessitant une précision importante sur les caractéristiques temporelles des bruits électromagnétiques

observés dans le domaine ferroviaire, il est essentiel d'utiliser des fréquences d'échantillonnages très élevées, largement supérieures à F_N .

- Le « Trig level » est fixé selon le bruit EM permanent et mesuré dans l'environnement électromagnétique. Généralement, l'opérateur fixe un niveau de Trig légèrement supérieur à ce niveau de bruit permanent observé au début d'une mesure de caractérisation dans le domaine temporel.

- La fenêtre temporelle d'enregistrement, définit la durée temporelle sur laquelle sont enregistrés les bruits électromagnétiques dont le niveau est supérieur à la valeur de « Trig Level ».

La durée maximale de cette fenêtre est souvent limitée par la profondeur de mémoire de l'oscilloscope numérique, mais il est toujours préférable d'éviter l'utilisation des fenêtres d'enregistrement trop longues.

En effet, plus la durée de la fenêtre est grande et plus la durée de son enregistrement dans le disque dur de l'oscilloscope est longue, et donc tous les bruits EM qui apparaissent durant le temps d'enregistrement de cette fenêtre ne seront pas enregistrés.

De plus, le traitement ultérieur de ces fenêtres peut être très difficile, très couteux en temps de traitement et nécessiter des ressources importantes.

Par ailleurs, la durée de cette fenêtre doit être fixée selon les caractéristiques temporelles des signaux électromagnétiques qu'on désire mesurer et caractériser. Pour le cas des signaux transitoires observés dans le domaine ferroviaire on verra qu'il est toujours préférable de les enregistrer sur des fenêtres temporelles de longueurs comparables à leur durée. De plus amples détails sur ce type de mesure seront donnés dans la suite de ce chapitre.

- Les paramètres d'échelles de temps et d'amplitude de l'oscilloscope numérique sont très importants pour des mesures effectuées dans le domaine temporel.

- * Les paramètres d'échelles d'amplitude ont une influence importante sur la précision des niveaux de bruit électromagnétique mesurés. En effet, dans le cas d'une mesure de champ électromagnétique dont l'amplitude maximale est très faible par rapport à l'échelle maximale de l'oscilloscope définie par l'utilisateur, la mesure de ce signal sera effectuée avec une précision faible, puisque les échantillons prélevés sur le signal mesuré seront codés sur un petit nombre de bits.

Par ailleurs, lorsque le niveau du bruit électromagnétique mesuré est grand par rapport à l'échelle maximale définie par l'utilisateur, l'oscilloscope enregistre des signaux temporels avec des amplitudes écrêtées. Il faut donc choisir ce paramètre d'échelle d'une manière judicieuse afin d'obtenir des mesures précises et non écrêtées par l'oscilloscope numérique.

- * Les paramètres d'échelles de temps sont aussi fixés par l'utilisateur. Ce paramètre contrôle généralement l'échelle des temps de l'écran d'affichage de l'oscilloscope.

Généralement, l'échelle temporelle est fixée afin de permettre à l'utilisateur d'observer sur l'écran de l'oscilloscope la totalité de la fenêtre temporelle enregistrée. Par ailleurs, l'utilisateur peut choisir de fixer ce paramètre d'une manière à ne visualiser qu'une petite partie de la fenêtre temporelle enregistrée.

D'autres paramètres de configuration de l'oscilloscope existent, tels que le mode de détection (Single, auto...), le mode de filtrage (AC ou DC)... etc. mais ne sont pas présentés ici.

2.2. Avantages et inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel

2.2.1. Les avantages de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel

La caractérisation électromagnétique dans le domaine temporel est généralement très adaptée à la mesure et la caractérisation des perturbations électromagnétiques rapides telles que les événements électromagnétiques transitoires observés dans le domaine ferroviaire, notamment les perturbations qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe lors d'un contact faible entre ces deux composants puisqu'elle peut permettre d'étudier facilement leurs caractéristiques temporelles et d'amplitudes crêtes.

De plus, la détection des événements transitoires ne dépend que d'un seul paramètre (le niveau de Trig) et ce paramètre n'a aucune influence sur la valeur enregistrée de l'amplitude du bruit EM transitoire mesuré.

La caractérisation dans le domaine temporel permet la séparation entre les perturbations électromagnétiques transitoires et les perturbations EM permanentes. En effet, les signaux enregistrés par l'oscilloscope se limitent aux bruits EM dont l'amplitude est supérieure au « Trig Level » définie par l'opérateur. Si le niveau de Trig est fixé correctement à un niveau supérieur au niveau de bruit EM permanent observé et que le niveau de bruit électromagnétique permanent reste constant sur toute la durée de la mesure, seules les perturbations électromagnétiques transitoires dont l'amplitude est supérieure à ce niveau de Trig seront enregistrées.

En conséquence, l'étude des caractéristiques temporelles des événements transitoires peut être réalisée d'une manière très simple, sans devoir séparer les événements transitoires des événements permanents lors du post traitement.

2.2.2. Les inconvénients de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel

La caractérisation des environnements électromagnétiques avec une méthode temporelle présente quelques contraintes : à la fin d'une mesure à l'aide d'un oscilloscope numérique, la quantité d'information obtenue est généralement très importante. En effet, si l'environnement EM d'essai est caractérisé par beaucoup d'événements transitoires et si chaque événement transitoire observé durant la mesure est enregistré dans un fichier dans la mémoire de l'oscilloscope, à la fin de la mesure, on aura une quantité importante de fichiers à traiter.

Généralement, les résultats de mesure obtenus par la méthode de caractérisation temporelle ne sont pas facilement exploitables. Les fichiers temporels donnent la forme d'onde des bruits EM ainsi que leurs amplitudes crêtes, mais ne donnent pas directement une idée sur l'étalement spectral de ces perturbations et les niveaux de bruit EM qu'ils génèrent sur les bandes de fréquence qu'ils couvrent. Il faut toujours passer par une étape de post traitement de ces résultats pour pouvoir les comparer directement aux niveaux limites d'émission EM présentés dans les normes CEM et donnés sous forme d'abaque en fonction de la fréquence.

Ce post traitement n'est généralement pas souhaitable pour le développement d'une méthode standardisée de caractérisation EM.

En effet, chaque étape d'un processus de traitement de fichiers temporels peut être réalisée par différentes méthodes et algorithmes, ce qui peut introduire des problèmes de reproductibilité des résultats et peut biaiser leur interprétation.

De ce fait, aucune norme CEM ne recommande la caractérisation des environnements électromagnétiques dans le domaine temporel.

II. MISE EN ŒUVRE DES METHODES DE CARACTERISATION ELECTROMAGNETIQUE A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT ET POST-TRAITEMENTS ASSOCIES

Dans cette partie, les deux méthodes de caractérisation temporelle et fréquentielle seront testées pour caractériser les perturbations EM observées à l'endroit de fixation des antennes d'émission / réception du système de communication et de gestion de trafic ferroviaire GSM-R.

La caractérisation des bruits électromagnétiques observés à bord d'un train doit être réalisée selon les normes, en utilisant des antennes de mesure traditionnelles, telles que les antennes biconiques, log-périodiques, cornets...etc.

L'utilisation de ce type d'antenne peut être adaptée à des mesures à l'intérieur du train, par contre elles ne conviennent pas à des mesures de perturbations EM à l'extérieur du train, notamment aux endroits de fixation des antennes GSM-R.

En effet, ces antennes traditionnelles ne peuvent pas être fixées d'une manière sécurisée au-dessus du train. Le choix a donc été de faire la caractérisation des bruits EM au-dessus du train à l'aide d'antennes GSM-R, qui offrent les propriétés nécessaires de rigidité, aérodynamisme et d'étanchéité préconisées pour ce type de mesures. Une caractérisation EM basée sur l'utilisation des antennes GSM-R limitera donc les bandes de mesure aux bandes pour lesquelles ces antennes sont adaptées (bande GSM-R) et les résultats présentés dans la suite de ce manuscrit ne sont valables que pour le système GSM-R.

La première partie décrit les deux campagnes de mesures réalisées au cours de ces travaux à bord d'un train en mouvement sous plusieurs configurations d'opérations.

La configuration et la technique adoptée pour caractériser cet environnement par la méthode de caractérisation fréquentielle sont décrites dans la deuxième partie, tandis que la troisième partie décrit la configuration de mesure adoptée pour la caractérisation de cet environnement dans le domaine temporel.

1. Description des campagnes de mesure

Campagne de mesure A

Les deux types d'alimentations généralement utilisées en France pour l'alimentation des trains sont le 1500 V DC et le 25000 V AC (50 Hz). Les amplitudes et les formes des courants consommés sous ces deux alimentations sont généralement très différentes. Ceci peut avoir une influence non négligeable sur les bruits électromagnétiques émis sous ces deux alimentations. Il a donc fallu faire des mesures de champ EM sur un parcours permettant de circuler sur les deux types d'alimentation.

Le choix a été de faire les mesures sur la ligne située entre Villeneuve-Saint-Georges dans la banlieue Parisienne et Nevers. Le parcours est présenté sur la Fig. 2. 4.

Les mesures présentées dans cette partie ont été réalisées dans le cadre du projet Européen RAILCOM [II-3].

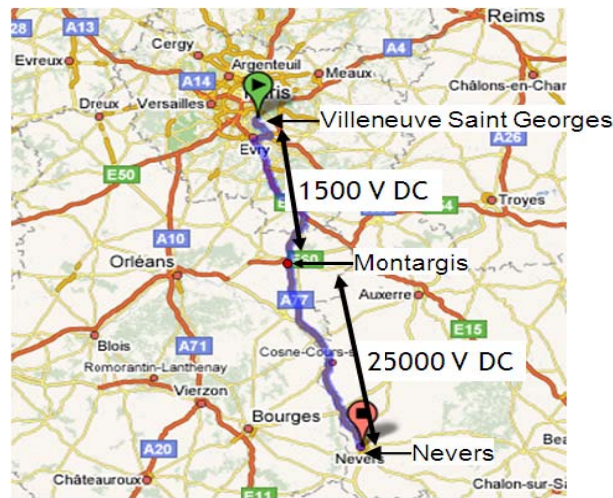


Fig. 2. 4. Parcours du train sur la campagne de mesure

Les mesures ont été effectuées sur trois journées durant le mois de décembre 2006 en effectuant un aller-retour par jour.

La distance d'un aller simple est de 240 km, comprenant 120 km sous 1500 V DC (entre Villeneuve saint Georges et Montargis) et 120 km sous 25000 V AC (de Montargis à Nevers). On notera que cette ligne n'est pas équipée par le système GSM-R. Ce choix a été fait afin de pouvoir caractériser les perturbations EM permanentes et transitoires observées par les antennes GSM-R embarquées à bord d'un train en mouvement sans subir les signaux EM émis par les antennes relais d'émission réception du système GSM-R. L'étude se limite à la caractérisation des bruits EM dans la bande de fréquence 300 MHz – 1 GHz.

La vitesse de croisière du train a été maintenue à environ 120 km/h et la durée du voyage était d'environ 2 heures et 20 minutes.

Les mesures ont été réalisées à bord d'un train composé d'une locomotive et deux voitures d'essais appartenant à la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF).

La configuration du train et les caractéristiques du parcours sont présentées respectivement sur la Fig. 2. 5. et la Fig. 2. 6.

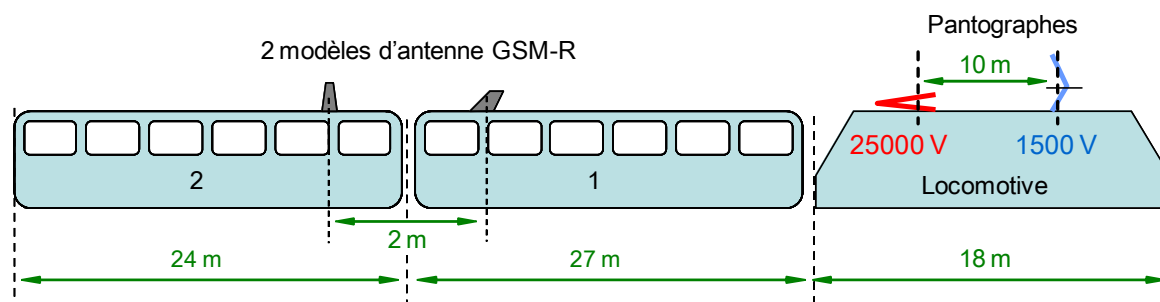


Fig. 2. 5. Configuration de mesure lors de la campagne A



Fig. 2. 6. Caractéristiques du parcours du train lors de la campagne A

La locomotive utilisée est une machine de Fret 27000 [Annexe 1], permettant la circulation sous deux électrifications différentes, à savoir le 1500 V DC et le 25000 V AC (50 Hz).

Elle comporte deux pantographes espacés de 10 mètres, permettant chacun l'alimentation du train en électricité sous une des deux électrifications.

Dans le cadre de ces mesures on a choisi de travailler avec deux antennes GMR-R de modèles différents afin d'avoir une idée sur les caractéristiques de différents types d'antennes GSM-R existant sur le marché.

Les deux modèles d'antennes GSM-R présentées sur la Fig. 2. 7. ont été utilisées au cours des mesures.

Dans cette partie, ces deux antennes seront nommées antenne « oblique » et antenne « droite ».

La bande passante de ces deux antennes couvre la bande GSM-R (870 MHz – 960 MHz) ainsi que la bande de la radio sol-train actuellement en service sur le territoire français (440 MHz – 470 MHz).

Contrairement aux antennes cornets ou log-périodiques, la qualité de réception de ces antennes GSM-R n'est pas constante sur toute la bande de fréquence étudiée 300 MHz – 1 GHz. En effet, ces antennes sont principalement optimisées entre 440 MHz – 470 MHz et entre 870 MHz – 960 MHz.

Dans le cas de mesures effectuées sur des bandes de fréquence plus larges avec ces antennes, il est nécessaire de tenir compte de la réponse, non constante, de l'antenne sur la bande de fréquence étudiée afin de récolter des résultats de mesures pertinents.

L'antenne oblique a été placée sur la voiture numéro 1 à environ 1 m du soufflet et l'antenne droite a été installée sur la deuxième voiture, à 2 m de l'antenne oblique, comme présenté sur la Fig. 2. 5.

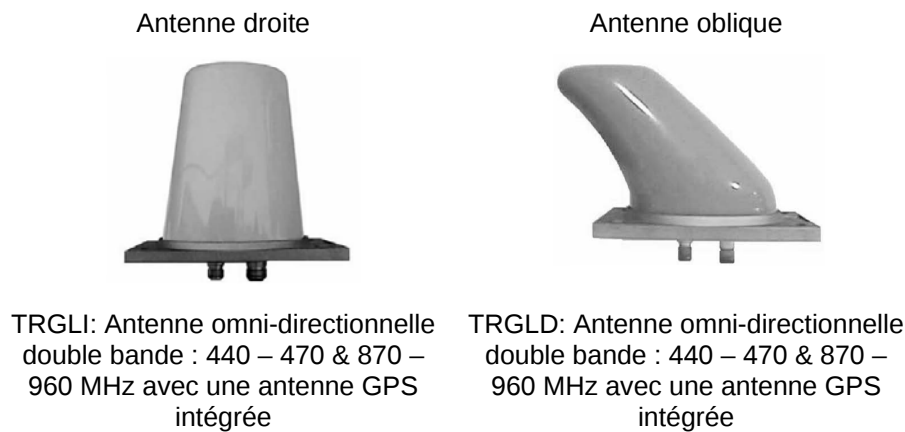


Fig. 2. 7. Représentation des deux antennes GSM-R utilisées au-dessus du train

Les paramètres de réflexions S_{11} entre 300 MHz et 1 GHz ont été mesurés lorsqu'elles étaient placées au-dessus du toit du train.

Il faut noter que le toit du train est généralement fabriqué en matériau composite, pas nécessairement parfaitement conducteur, les paramètres de réflexion de ces antennes au-dessus du train peuvent être différents de ceux obtenus en laboratoire.

En comparant leur paramètre de réflexion respectif, nous pouvons identifier les bandes de fréquence sur lesquelles leurs comportements sont proches et sur lesquelles les puissances reçues par les deux antennes peuvent être comparées.

La Fig. 2. 8. représente les paramètres S_{11} des deux antennes GSM-R installées au-dessus du train sur la bande de fréquence allant de 300 MHz à 1 GHz.

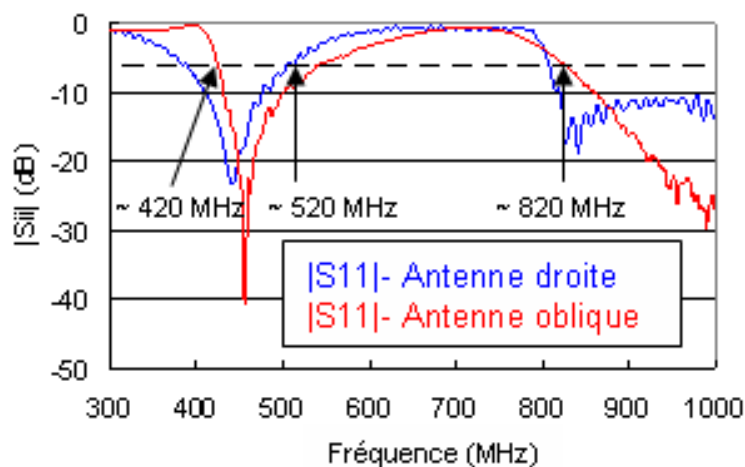


Fig. 2. 8. Paramètres de réflexion S_{11} des deux antennes GSM-R installées au-dessus du train

Les courbes rouge et bleue représentent les modules des paramètres S_{ii} mesurés respectivement aux sorties des antennes oblique et droite.

Cette figure montre que les deux antennes couvrent les mêmes bandes de fréquences mais possèdent un comportement légèrement différent en termes de réflexion.

Pour pouvoir exploiter et comparer correctement les mesures obtenues sur les deux antennes, il faut déterminer les bandes de fréquence sur lesquelles elles peuvent être considérées comparables.

Sur les bandes de fréquence où les paramètres de réflexion des deux antennes avoisinent 0 dB, les puissances mesurées par les antennes ne peuvent pas être représentatives du bruit électromagnétique ambiant.

En revanche, on a supposé que sur les bandes de fréquence où les paramètres S_{ii} des deux antennes sont inférieurs à -6 dB (ligne en pointillés sur la Fig. 2. 8.), leurs comportements peuvent être considérés semblables et les signaux reçus par les deux antennes peuvent être comparés. Ce postulat sera vérifié dans la partie II.2 de ce chapitre.

Les bandes de fréquence sur lesquelles des comparaisons fiables peuvent être menées ont ainsi été définies selon le critère $|S_{ii}| < -6$ dB. Les bandes de fréquence qui vérifient ce critère sont donc [420 à 520] MHz et [820 à 1000] MHz. On note ici que sur ces bandes de fréquence, l'écart entre les S_{ii} des deux antennes GSM-R peut atteindre 10 dB. Cependant, on verra aussi que le protocole de mesure (présenté dans le paragraphe II. 2.) qui sera employé pour la mesure du bruit EM ambiant permet d'obtenir des résultats de mesures comparables avec les deux antennes malgré l'écart important des $|S_{ii}|$ des deux antennes sur les bandes de fréquence définies plus haut.

Campagne de mesure B

La deuxième campagne de mesure a été réalisée sur la ligne Blois – Saint Pierre des Corps – Nantes. Ce parcours est l'un des rares en France permettant de circuler sous les deux électrifications utilisées (1500 V DC et 25000 V AC 50 Hz) avec des vitesses maximales qui peuvent atteindre 200 km/h et une vitesse de croisière qui varie entre 160 km/h et 180 km/h. Sur quelques portions de cette ligne, le TGV circule aux mêmes vitesses que celles utilisées pour ces mesures.

La distance de ce parcours est de l'ordre de 300 km avec 70 km entre Blois et Saint Pierre des Corps et 230 km entre Saint Pierre des Corps et Nantes. Cette ligne n'est pas équipée par le système GSM-R.

La Fig. 2. 9. donne le parcours du train durant les tests.

La campagne de mesure a été effectuée sur 4 jours au cours du mois de Juin 2008.

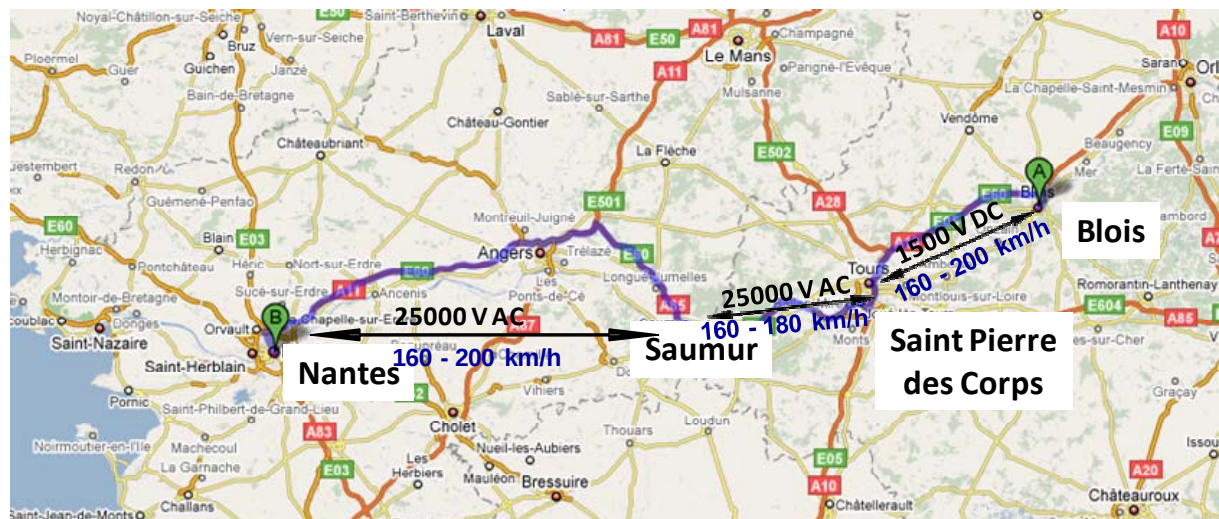


Fig. 2. 9. Parcours du train durant les tests

Les mesures ont été réalisées à bord d'un train composé d'une locomotive et sept voitures. Six voitures de voyageurs et une voiture de test.

Les vitesses de circulation élevées du train imposent l'utilisation de ce nombre de voitures afin d'offrir au train des capacités suffisantes de freinage lui permettant de s'arrêter sur des distances de sécurité prédéfinies.

3 antennes GSM-R différentes ont été fixées sur le toit de la voiture de test.

La locomotive utilisée est une motrice de type 26000 [Annexe 2] appartenant à la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), permettant de circuler sous les deux électrifications précitées avec les vitesses requises. Pour se faire, la locomotive dispose de deux pantographes, permettant chacun de circuler sur une des deux électrifications.

La voiture de test a été placée lors de la majorité des mesures au milieu du train, comme présenté sur la Fig. 2. 10.

Chaque voiture de voyageurs a une longueur de 27 mètres et la voiture de test a une longueur de 24 mètres. La distance séparant les deux pantographes est de 10 m.

Sous la configuration présentée sur la Fig. 2. 10. les antennes de mesures sont situées à une distance d'environ 80 mètres du pantographe.

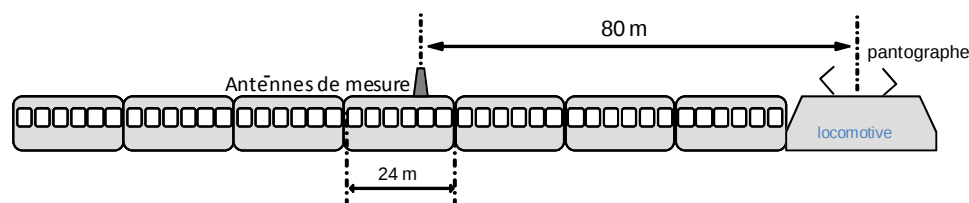


Fig. 2. 10. Configuration du train utilisé lors de la campagne de mesure

La Fig. 2. 11. présente la disposition des antennes GSM-R telles qu'elles ont été fixées au-dessus du toit de la voiture de test.

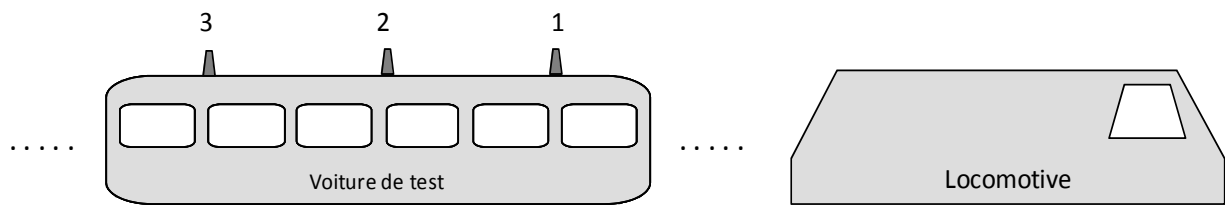


Fig. 2. 11. Configuration des antennes GSM-R de mesure

- L'antenne 1 est une antenne mono-bande qui fonctionne sur la bande 700 MHz – 1000 MHz.
 - Les antennes 2 et 3 sont deux antennes bi-bandes.
- L'antenne 2 fonctionne sur la bande 400 MHz – 500 MHz et la bande 750 MHz – 1000 MHz.
 L'antenne 3 fonctionne sur la bande 400 MHz – 500 MHz et la bande 800 MHz – 1000 MHz.

Les Fig. 2. 12. (a), Fig. 2. 12. (b) et Fig. 2. 12. (c) donnent respectivement l'amplitude du paramètre de réflexion S_{11} des antennes 1, 2 et 3.

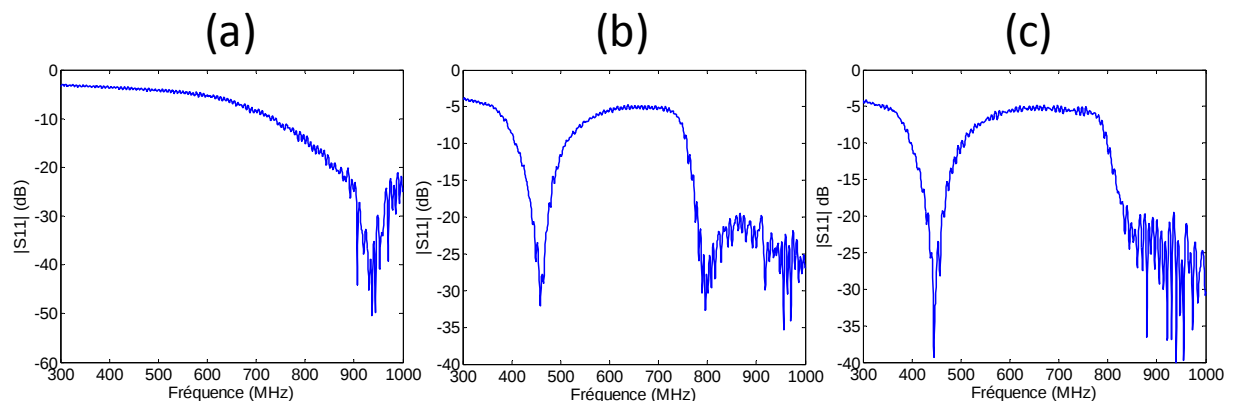


Fig. 2. 12. Paramètres de réflexion $|S_{11}|$ de l'antenne 1 (a), paramètre S_{11} de l'antenne 2 (b) et le paramètre S_{11} de l'antenne 3 (c)

2. Mesures dans le domaine fréquentiel

Les résultats présentés dans la suite de ce chapitre sont issus de la « Campagne de mesure A ».

Les analyseurs de spectre permettent de couvrir aisément la bande de fréquence à étudier et ne nécessitent pas de traitement complexe pour obtenir les grandeurs de champs électrique et magnétique en fonction de la fréquence. De plus, comme cela a été présenté précédemment, dans le cas où l'on cherche à caractériser un environnement EM où apparaissent des perturbations de courte durée, il est possible d'employer la fonction « Maxhold ».

Cette fonction permet de comparer plusieurs acquisitions successives pour ne conserver que les mesures maximales obtenues sur chacune des fréquences étudiées. En revanche, les

mesures effectuées avec un analyseur de spectre nécessitent de fixer préalablement certains paramètres tels que la bande de fréquence, la bande de résolution, le temps de balayage ainsi que le mode de détection. Or, tous les paramètres peuvent avoir un impact considérable sur les résultats de mesure.

Dans cette étude, la bande de fréquence étudiée a été fixée entre 300 MHz et 1 GHz, ce qui correspond à la bande la mieux couverte par les antennes utilisées parmi les bandes d'analyse spécifiées dans la norme EN 50121.

- Protocole de mesure employé

Dès lors que la largeur de la bande de fréquence est fixée, le temps de balayage minimum est limité par le choix de la bande de résolution. Notre objectif étant de collecter les amplitudes maximales des perturbations EM en prenant en compte les événements transitoires, nous avons opté pour le balayage le plus rapide possible et nous avons combiné le mode de détection crête avec la fonction « Maxhold ». Cette fonction ne conserve que les niveaux maximums mesurés pour chaque fréquence sur une durée déterminée.

Dans ce travail, les spectres obtenus par cette fonction sont enregistrés toutes les deux secondes. L'analyseur de spectre permettant d'enregistrer 501 points de fréquence pour chaque acquisition. Les spectres collectés forment une matrice de 501 colonnes correspondant à chaque point de fréquence testé, et chaque ligne de cette matrice correspond aux puissances enregistrées successivement toutes les 2 secondes.

Le choix de la bande de résolution RBW peut avoir un effet important sur les amplitudes enregistrées ainsi que sur le temps de balayage minimum de la bande de fréquence étudiée. La RBW spécifiée par la norme EN 50121 pour la bande de fréquence allant de 300 MHz à 1 GHz est de 120 kHz ou 100 kHz, ce qui correspond à la bande passante des équipements de radio communication analogiques.

Cependant, une RBW de 120 kHz n'est pas nécessairement adaptée aux équipements de transmission numérique GSM-R. En effet, le RBW doit être au plus proche de la bande passante du filtre d'entrée du système de communication à protéger, afin d'estimer correctement le signal à l'entrée du mobile GSM-R lors d'un transitoire.

Nous avons souhaité comparer des résultats de mesure obtenus simultanément sur les deux antennes GSM-R en utilisant des RBW différentes.

Néanmoins, afin d'analyser l'impact de la RBW à partir de ces résultats de mesure, nous avons dû nous assurer que les antennes utilisées offraient des qualités de réception équivalentes pour les fréquences 420 MHz – 520 MHz et 820 MHz – 1000 MHz sur lesquelles le $|S_{11}| < -6$ dB.

2.1. Comparaison des comportements des deux antennes avec le protocole de mesure adopté

Pour comparer le comportement des deux antennes avec des mesures effectuées selon le protocole décrit plus haut, on a effectué des mesures dans le domaine fréquentiel en utilisant deux analyseurs de spectre connectés chacun à une des deux antennes GSM-R installées sur le toit du train. Les deux analyseurs ont été configurés avec les mêmes paramètres de mesures. Sous une alimentation de 1500 V DC, les deux analyseurs de spectre ont été utilisés en même temps pour mesurer le bruit électromagnétique reçu par les deux antennes GSM-R sur 10 minutes de temps, en employant le protocole de mesure présenté plus haut.

La Fig. 2. 13. présente un exemple de résultats de mesure obtenus sur 10 minutes avec l'analyseur de spectre connecté à l'antenne droite sur la bande de fréquence 400 MHz – 600 MHz en appliquant la fonction « MaxHold » toutes les deux secondes.

Chaque ligne de la Fig 2. 13. représente un spectre enregistré par l'analyseur de spectre toutes les 2 secondes avec la fonction « Maxhold ».

La puissance enregistrée sur chaque fréquence est présentée selon un code couleur dont l'échelle est donnée à droite de la Fig 2. 13.

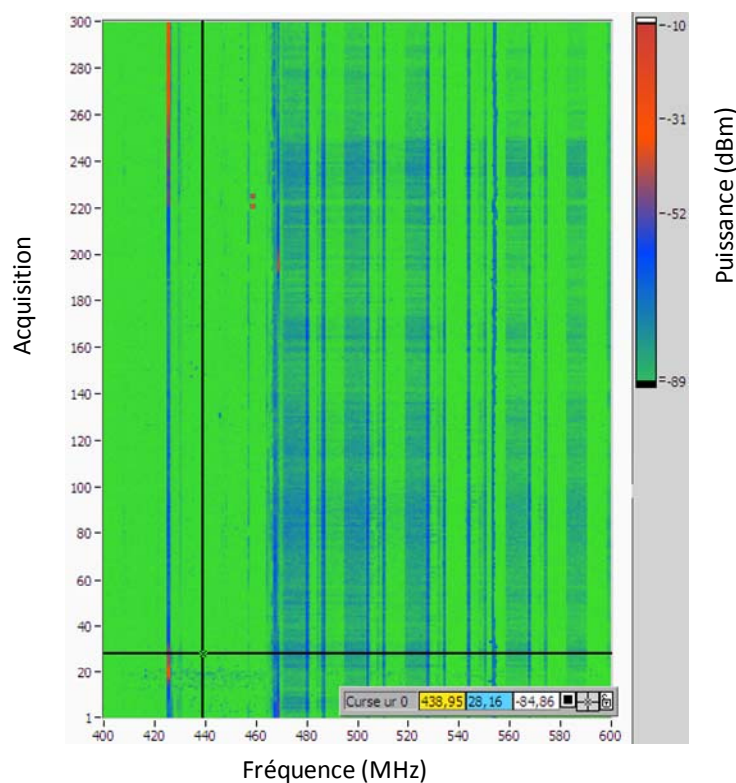


Fig. 2. 13. Puissance maximale mesurée toutes les deux secondes par l'analyseur de spectre sur une durée de dix minutes

Dans une étape de post traitement, les spectres ont été comparés deux à deux afin de déterminer la puissance maximale reçue sur chaque fréquence durant les 10 minutes de mesures.

La Fig. 2. 14. présente les niveaux de puissance maximums obtenus sur la totalité de la mesure avec les deux analyseurs de spectre sur la bande de fréquence 400 MHz – 600 MHz avec un RBW = 100 kHz.

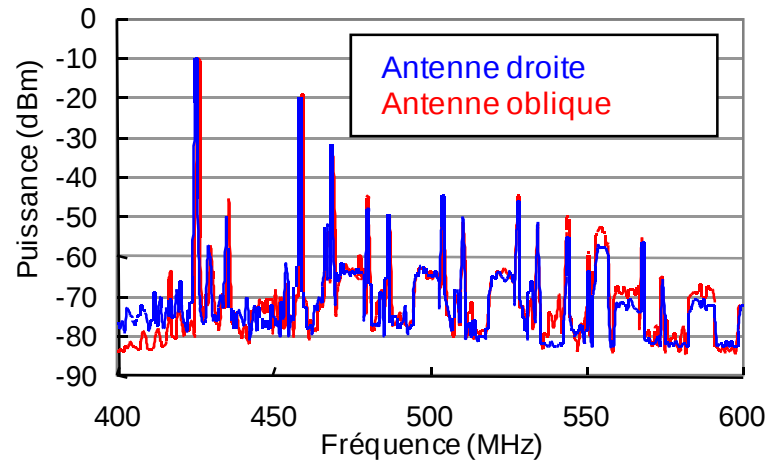


Fig. 2. 14. Comparaison entre les deux antennes : Amplitudes maximales mesurées sur 10 minutes avec deux analyseurs de spectres sur la bande 400 MHz – 600 MHz

Sous cette même configuration, la même mesure a été réalisée sur 10 minutes sous la bande de fréquence 850 MHz – 1000 MHz.

La Fig. 2. 15. présente les niveaux de puissance maximums obtenus sur cette bande de fréquence avec un RBW = 100 kHz.

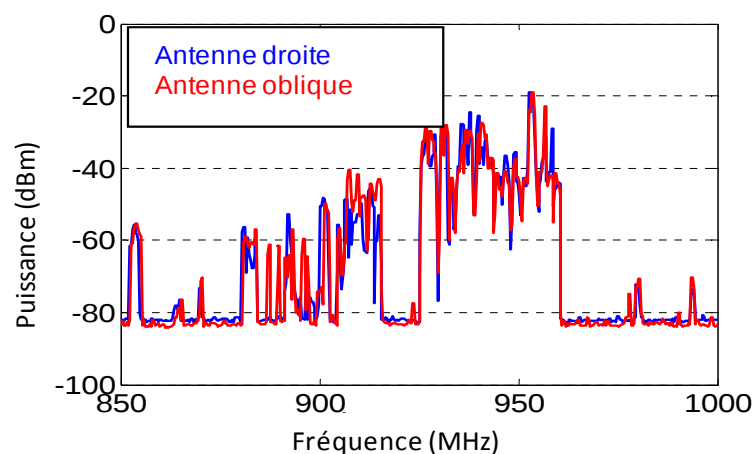


Fig. 2. 15. Comparaison entre les deux antennes : Amplitudes maximales mesurées sur 10 minutes avec deux analyseurs de spectres sur la bande 700 MHz – 1000 MHz

Sur les deux Fig. 2. 14. et Fig 2. 15., la ligne rouge correspond au signal mesuré avec l'antenne oblique et la courbe bleue correspond à celui mesuré à partir de l'antenne droite.

Sur la Fig. 2. 14., les deux courbes sont quasiment en parfait accord, principalement entre 425 MHz et 530 MHz. Ces résultats confirment que les antennes ont un comportement équivalent sur cette bande de fréquence.

La Fig. 2. 15. confirme que les deux antennes GSM-R ont un comportement équivalent entre 850 MHz et 1000 MHz.

L'impact de la bande de résolution peut alors être étudié en effectuant des mesures simultanées sur les deux antennes avec des RBW différentes.

2.2. Influence de la bande de résolution (RBW) de l'analyseur de spectre sur la mesure des événements transitoires observés par les antennes GSM-R à bord d'un train en mouvement

Comme cela a été déjà présenté plus haut, la largeur de bande de résolution (RBW) de l'analyseur de spectre a une influence importante sur les niveaux de bruit EM enregistrés. En effet, plus la bande de résolution est élevée, plus le niveau de bruit vu par l'analyseur de spectre est élevé. De plus, dans le cas où la mesure se fait dans un environnement comportant des perturbations EM transitoires, la bande de résolution peut avoir un impact sur la mesure des composantes fréquentielles de ces événements transitoires, puisque, plus le RBW est large et plus le Sweep Time (ST) est court.

Dans le cas où le ST de l'analyseur de spectre est inférieur ou égal à la durée d'un événement transitoire, l'analyseur peut afficher correctement toutes les composantes fréquentielles de cet événement. Mais, puisque le ST le plus court employé par les analyseurs de spectre actuels est souvent plus long que la durée des événements transitoires, augmenter la largeur du RBW ne permet que rapprocher le ST de l'analyseur de la durée des événements transitoires.

Donc pour mesurer des événements transitoires avec un analyseur de spectre il est préférable d'utiliser des valeurs de RBW larges pour que l'analyseur puisse mesurer à chaque balayage le maximum des composantes fréquentielles de l'événement transitoire.

En appliquant le protocole de mesure basé sur l'utilisation de la fonction « Maxhold » décrit précédemment, on peut avoir une image du spectre des événements transitoires avec un analyseur de spectre.

On s'intéressera dans cette partie à l'influence du RBW sur les mesures d'événements transitoires à l'aide d'un analyseur de spectre.

On a effectué des mesures de champ électromagnétique en connectant deux analyseurs de spectre aux deux antennes GSM-R fixées sur le toit du train. L'analyseur de spectre connecté à l'antenne oblique a été configuré avec un RBW = 100 kHz et l'analyseur de spectre connecté à l'antenne droite a été configuré avec un RBW = 1 MHz.

La Fig. 2. 16. montre la configuration de mesure adoptée.

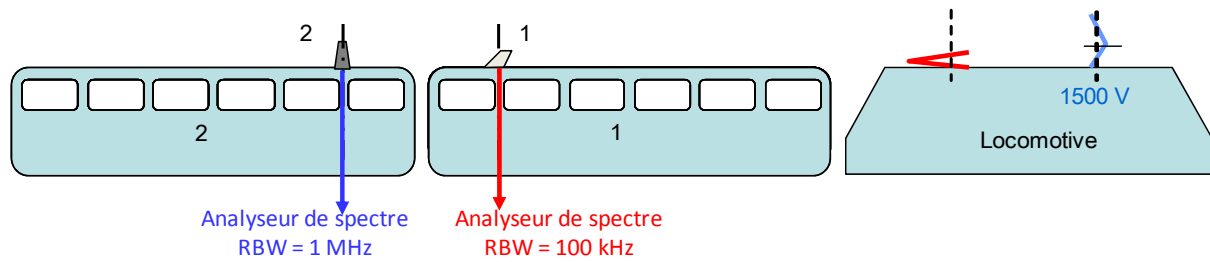


Fig. 2. 16. Configuration de mesure avec deux analyseurs de spectre utilisés avec deux RBW différents

Les mesures ont été réalisées sur une durée de 10 minutes sous une électrification de 1500 V DC avec une vitesse de croisière de 120 km/h.

Les mesures ont été réalisées entre 300 MHz et 1000 MHz.

L'analyseur de spectre configuré avec un RBW = 100 kHz balaye la bande de fréquence explorée avec un ST = 210 ms et l'analyseur de spectre configuré avec un RBW = 1 MHz balaye la même bande de fréquence avec un ST = 50 ms.

La Fig. 2. 17. donne les résultats de la mesure du bruit EM enregistré simultanément par les deux analyseurs de spectre sur une bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

Les courbes bleue et rouge présentent respectivement les puissances maximales de bruit électromagnétique observées sur chaque fréquence et mesurées par l'analyseur.

Pour mettre en valeur le bruit électromagnétique résultant des événements transitoires produits dans le domaine ferroviaire, sur les antennes GSM-R, la courbe noire donne l'amplitude du bruit électromagnétique mesuré à basse vitesse du train, en l'absence de tout événement transitoire entre la caténaire et le pantographe.

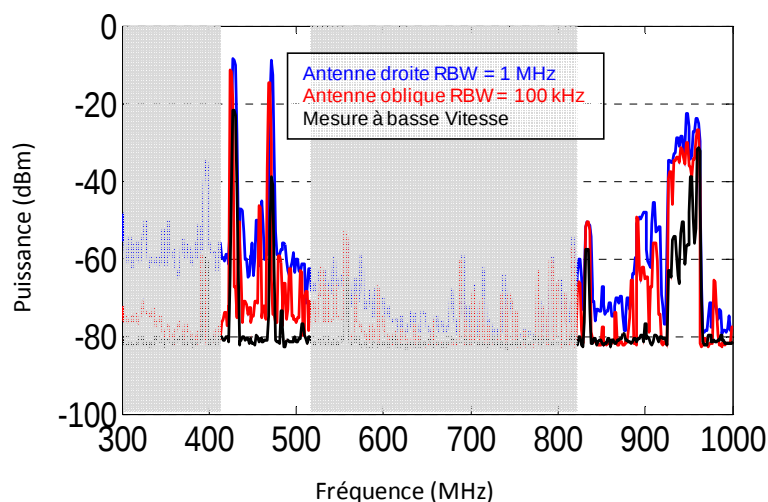


Fig. 2. 17. Amplitudes maximales mesurées simultanément avec deux analyseurs de spectre fonctionnant avec deux RBW différentes

Cette courbe indique que le niveau de référence du bruit est autour de -85 dBm. Les différences entre cette courbe et les courbes rouge et bleue illustrent le bruit produit spécifiquement par le train dans des conditions normales de fonctionnement.

Sur cette figure, les courbes sont comparées en dehors des zones ombrées, sur les bandes de fréquence [420 à 520] MHz et [820 à 1000] MHz où les deux antennes présentent des propriétés comparables.

- Impact sur la bande 420 MHz – 520 MHz

L'impact de la variation de la RBW est principalement observé sur la bande 420 MHz et 520 MHz, où les puissances mesurées aux sorties des antennes sont principalement dues au bruit électromagnétique produit par l'apparition des arcs entre le pantographe et la caténaire, lors des pertes de contact.

On remarque dans cette zone que le bruit électromagnétique mesuré avec un RBW de 1 MHz est supérieur au bruit EM mesuré avec un RBW de 100 kHz.

Cette différence est d'une part due à la largeur plus importante du RBW utilisé avec l'antenne oblique, mais aussi au fait que le temps nécessaire au balayage de la bande de fréquence explorée est plus court avec un RBW élevé.

La détection de ces événements de bruit EM transitoire est rendue plus simple avec un RBW de 1 MHz par rapport à un RBW de 100 kHz.

En effet, la probabilité de détection de ces événements transitoires avec un analyseur de spectre peut augmenter avec la RBW. Ainsi, entre 420 MHz et 520 MHz, les niveaux mesurés avec une RBW de 1 MHz sont plus importants que ceux obtenus avec une RBW de 100 kHz.

- Impact sur la bande 820 MHz – 1000 MHz

Sur la bande de fréquence allant de 820 MHz à 1 GHz, les puissances enregistrées proviennent principalement des porteuses émises par les stations GSM situées le long du trajet. Celles-ci forment des bruits permanents dont la mesure est peu influencée par la RBW et le temps de balayage.

En effet, sur cette bande de fréquence, les bruits EM émis lors de l'apparition des événements transitoires sont masqués par les niveaux élevés de bruit EM permanents émis par les émetteurs de GSM publics situés à proximité de la voie ferrée.

Les mesures présentées précédemment ont été réalisées sous un seul type d'électrification (1500 V-DC). Cependant, les trains circulent aussi sous 25000 V AC 50 Hz, il est intéressant de comparer l'influence de l'électrification sur les niveaux de bruit électromagnétique transitoire générés sur les antennes GSM-R embarquées. La partie suivante traite de l'influence de l'électrification sur les mesures de bruit EM effectuées à l'aide de la méthode fréquentielle.

2.3. Influence du type de l'électrification sur les niveaux de bruit EM générés sur les antennes GSM-R embarquées

On rappelle que les résultats présentés dans ce chapitre sont issus de la campagne de mesure A.

Une première mesure a été réalisée sous 25000 V AC 50 Hz avec un analyseur de spectre qui mesure le bruit électromagnétique sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

Sur dix minutes de trajet, on a mesuré le bruit électromagnétique observé sur l'antenne oblique à l'aide d'un l'analyseur de spectre sur lequel on a activé la fonction « Maxhold » et en employant un RBW = 100 kHz .

La configuration de mesure est présentée sur la Fig. 2. 18.

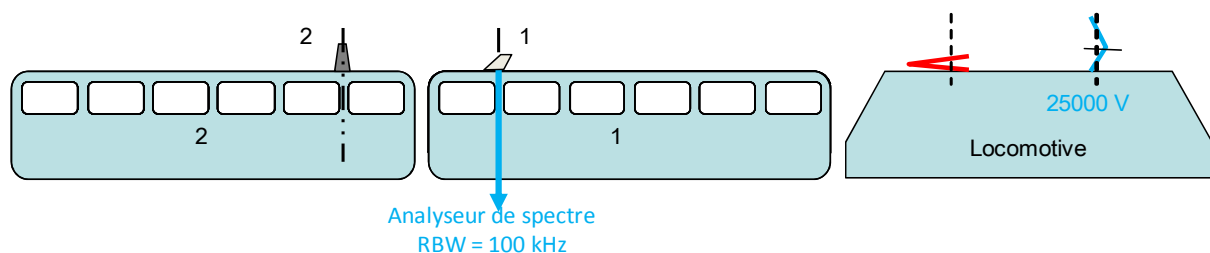


Fig. 2. 18. Configuration de mesure sous une électrification de 25000 V AC 50 Hz

La ligne bleue présentée sur la Fig. 2. 19. donne la puissance maximale mesurée par l'analyseur de spectre entre 300 MHz – 1000 MHz sous 25000 V AC 50 Hz sur les 10 minutes de mesure.

Afin de comparer l'influence de l'électrification sur les amplitudes de bruit EM générées sur l'antenne oblique, on a mesuré dans un premier temps, pendant dix minutes, le bruit EM vu par cette antenne sous 1500 V DC en utilisant un analyseur de spectre configuré avec un RBW = 100 kHz et la fonction « Maxhold ». Par la suite, avec la même configuration de mesure (antenne oblique connecté à un analyseur de spectre configuré avec un RBW = 100 kHz et utilise la fonction « Maxhold »), nous avons collecté, pendant 10 minutes, le bruit électromagnétique observé sur une zone du trajet sur laquelle le train fonctionne sous une électrification de 25000 V AC.

La courbe rouge de la Fig. 2. 19. donne la puissance maximale mesurée par l'analyseur de spectre connecté à l'antenne oblique sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

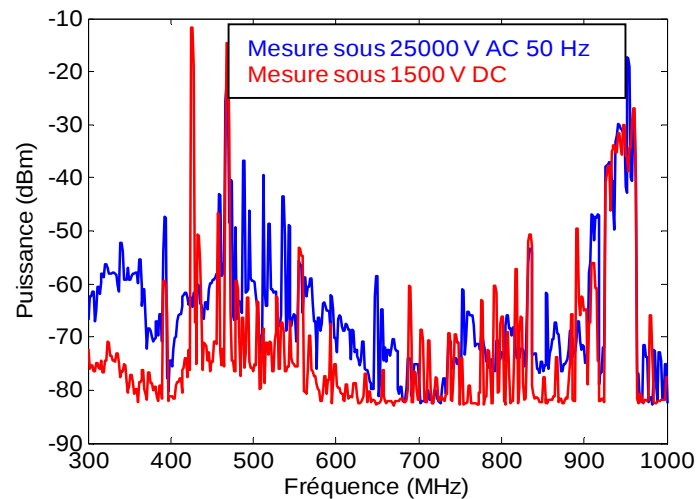


Fig. 2. 19. Puissance maximale mesurée par l'antenne GSM-R oblique sur la bande 300 MHz – 1000 MHz avec un RBW = 100 kHz sous 25000 V AC 50 Hz et 1500 V DC

Les deux résultats de mesure comparés sur la Fig. 2. 19. n'étant pas obtenus sous la même portion du trajet, il est donc normal que les deux courbes ne présentent pas des fréquences et des niveaux de bruit EM permanent (repérables facilement par des pics d'amplitude élevés) semblables.

Par exemple, les amplitudes de champ EM dues aux émetteurs d'ondes électromagnétiques volontaires, qui fonctionnent sur la bande de fréquence 400 MHz – 600 MHz (émetteurs de télévision analogique et numérique), et qui se trouvent à proximité de l'infrastructure ferroviaire peuvent paraître plus élevées que celles mesurées sous 25000 V AC. Ceci est dû principalement au fait que les mesures présentées par les deux courbes de la Fig 2.19. n'ont pas été effectuées dans la même zone géographique et les émetteurs d'ondes EM permanents ne sont donc pas nécessairement situés à des distances comparables de l'infrastructure ferroviaire.

Par contre, en dehors des bandes de fréquence utilisées par les émetteurs permanents, les bruits EM mesurés sous 25000 V AC 50 Hz sont plus élevés que ceux observés sous 1500 V DC.

L'électrification semble donc avoir un impact non négligeable sur les bruits EM transitoires générés sur les antennes embarquées.

L'impact de l'électrification sur les niveaux de bruit électromagnétique dans la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R avec un RBW = 100 kHz est présenté sur la Fig. 2.20.

Cette figure présente un zoom des résultats présentés par la Fig. 2. 19. sur la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R

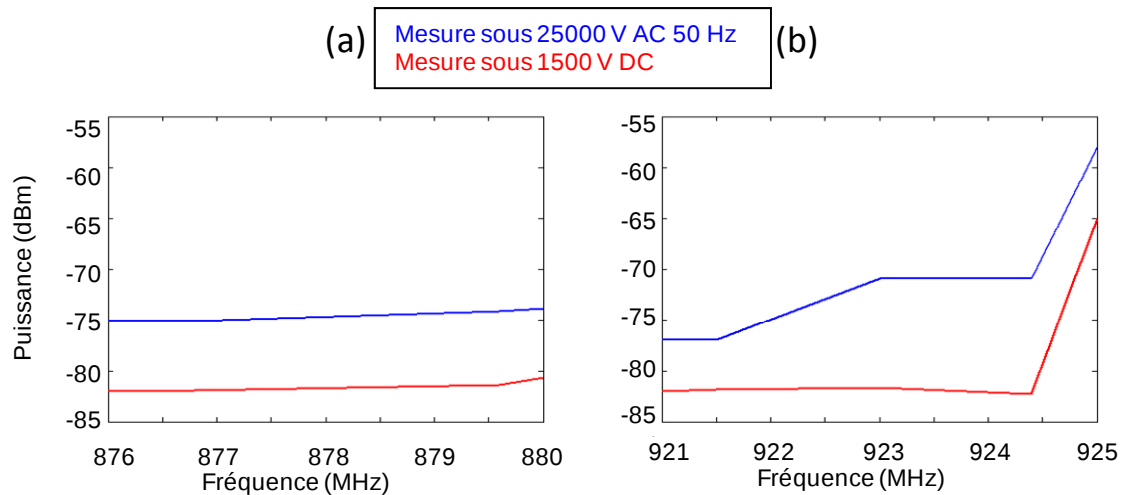


Fig. 2. 20. Bruit EM généré dans la bande de fréquence correspondant au lien montant du système GSM-R (a) et le lien descendant (b) sous les deux électrifications

Sur la Fig. 2. 20, la ligne bleue correspond au bruit électromagnétique maximal mesuré sous 25000 V AC 50 Hz et la ligne rouge correspond au bruit EM maximal mesuré sous 1500 V DC.

La Fig. 2. 20. (a) donne le bruit électromagnétique obtenu sur le lien montant du système GSM-R et la Fig. 2. 20. (b) donne le bruit électromagnétique sur le lien descendant.

Intuitivement, on s'attendait à un niveau de bruit EM généré sous 1500 V DC supérieur à celui obtenu sous 25000 V AC 50 Hz, puisque les amplitudes de courants qui sont consommés sous 1500 V DC sont largement supérieures à celles des courants consommés par le train sous 25000 V AC.

L'expérience montre ici le contraire, et on pense que ceci est principalement dû à la combinaison de deux raisons :

- Durant 10 minutes de mesure sous 25000 V AC, le nombre d'événements EM transitoires observés est généralement plus important que celui obtenu sous 1500 V DC, donc sous 25000 V AC, on a plus de chance de collecter des événements EM transitoires qui génèrent des niveaux de bruit EM élevés sur la bande de fonctionnement du système GSM-R.

- Avec l'utilisation de la fonction « Maxhold », il suffit donc qu'un seul événement transitoire apparaisse avec un niveau de bruit très élevé sur la bande de fonctionnement du système GSM-R pour que les résultats finaux montrent un niveau de bruit EM très élevé sous 25000 V AC comparé à celui mesuré sous 1500 V DC.

Donc on ne peut pas se limiter à ces résultats pour confirmer le fait que le bruit EM transitoire généré sur la bande de fonctionnement du système GSM-R sous une électrification 25000 V AC est supérieur à celui généré par les bruits EM transitoires qui apparaissent sous 1500 V DC.

On essayera par ailleurs de vérifier ces résultats à l'aide des mesures temporelles.

3. Mesures dans le domaine temporel

Comme cela a été dit précédemment, le temps de balayage « Sweep Time » des analyseurs de spectre est généralement très lent par rapport à la durée d'apparition des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement ; ceci est une des raisons principales qui rend les analyseurs de spectre non adaptés pour la mesure de ce type de bruit EM.

Les oscilloscopes numériques ont généralement des caractéristiques temporelles plus adaptées pour la mesure et l'enregistrement de ce type de bruit électromagnétique.

Cependant, les mémoires des oscilloscopes numériques étant limitées, il est très difficile d'enregistrer les bruits EM permanents et transitoires observés à bord des trains sur une longue durée (durée d'un trajet entre Paris et Montargis par exemple).

Pour cette raison, lors des mesures temporelles à l'aide d'un oscilloscope numérique, on opte généralement pour l'enregistrement exclusif des perturbations EM transitoires sur de courtes durées, généralement définies par l'opérateur et se rapprochant au maximum de la durée d'apparition de l'événement transitoire qu'on veut enregistrer.

Pour ce faire, on utilise généralement la fonction Trig de l'oscilloscope. Ce niveau, appelé aussi niveau de déclenchement d'enregistrement de l'oscilloscope, est généralement fixé à une valeur légèrement supérieure au niveau de bruit EM permanent observé à bord du train lors de son fonctionnement à basse vitesse (60 km/h selon la norme EN 50121).

Ainsi, l'oscilloscope n'enregistre que les bruits EM dont le niveau est supérieur à l'amplitude du bruit EM permanent.

Comme cela a été présenté au premier chapitre, au sein de l'infrastructure ferroviaire seules les perturbations EM transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe peuvent générer des bruits EM dans la bande de fonctionnement du système GSM-R.

Si on suppose que le bruit EM permanent est constant sur la durée des mesures et que chaque bruit électromagnétique transitoire dont les caractéristiques fréquentielles couvrent les bandes de fonctionnement du système GSM-R et qui apparaît avec une amplitude crête supérieure au niveau de Trig est enregistré par l'oscilloscope, alors tous les bruits EM transitoires enregistrés par l'oscilloscope correspondent aux bruits EM issus des événements transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe.

Malheureusement, le train étant en mouvement durant les mesures, le bruit électromagnétique permanent observé à bord du train n'est généralement pas de niveau constant.

Ainsi, la mesure réalisée à l'aide d'un oscilloscope numérique sera biaisée par les variations du niveau de bruit EM permanent, et en plus des bruits EM transitoires, l'oscilloscope peut enregistrer des fenêtres temporelles qui peuvent comporter des bruits permanents dont le niveau dépasse le niveau de Trig de l'oscilloscope.

L'opérateur peut par ailleurs essayer de faire varier le niveau de Trig de l'oscilloscope en l'ajustant à un niveau supérieur au bruit EM permanent durant la mesure afin de limiter l'influence de cette variation de bruit EM permanent.

Cependant, les effets de cette action restent limités puisque les variations du bruit EM permanent à bord d'un train en mouvement ne sont pas facilement prévisibles et on ne pourra

jamais éviter la collecte des fichiers de bruit EM permanent avec les fichiers de bruit transitoire.

Notre objectif étant de caractériser les bruits électromagnétiques transitoires observés par une antenne GSM-R à bord d'un train en mouvement, un post traitement des résultats est donc nécessaire afin de séparer les fichiers de bruit électromagnétique transitoire des fichiers de bruit électromagnétique permanent enregistré.

Ce post traitement sera présenté dans la suite de cette partie.

3.1. Description de la configuration de la mesure

Les mesures réalisées dans le domaine temporel ont été effectuées à l'aide d'un oscilloscope numérique disposant d'une bande passante de 6 GHz et pouvant échantillonner les signaux analogiques mesurés avec une fréquence d'échantillonnage maximale de 20 GHz.

Dans une première manipulation, on a connecté une entrée de l'oscilloscope à l'antenne GSM-R droite telle que c'est présenté sur la Fig. 2. 21.

Sur cette manipulation l'antenne oblique n'a pas été utilisée.

La profondeur de mémoire de l'oscilloscope a été fixée afin d'enregistrer les bruits électromagnétiques sur des durées de 500 ns. Cette valeur a été choisie d'une manière arbitraire, suite à plusieurs essais expérimentaux, afin de permettre d'enregistrer la totalité de chaque bruit EM transitoire qui peut apparaître sur l'antenne GSM-R fixée au-dessus du train. La mesure a été effectuée au départ de Nevers avec un niveau de Trig fixé à 20 mV.

Sur le trajet Nevers – Paris on a collecté 1586 fichiers correspondant à des bruits électromagnétiques permanents et transitoires dont l'amplitude maximale est supérieure au niveau de Trig de l'oscilloscope.

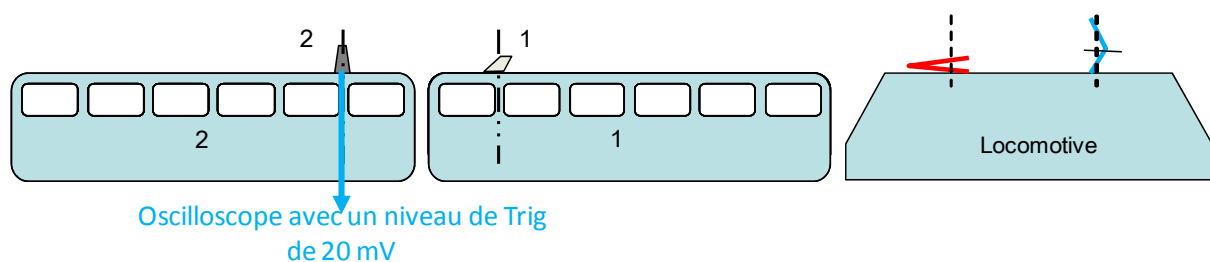


Fig. 2. 21. Configuration de mesure dans le domaine temporel

Sur la Fig. 2. 22. on présente des exemples de perturbations EM enregistrées à l'aide de l'oscilloscope sur ce trajet.

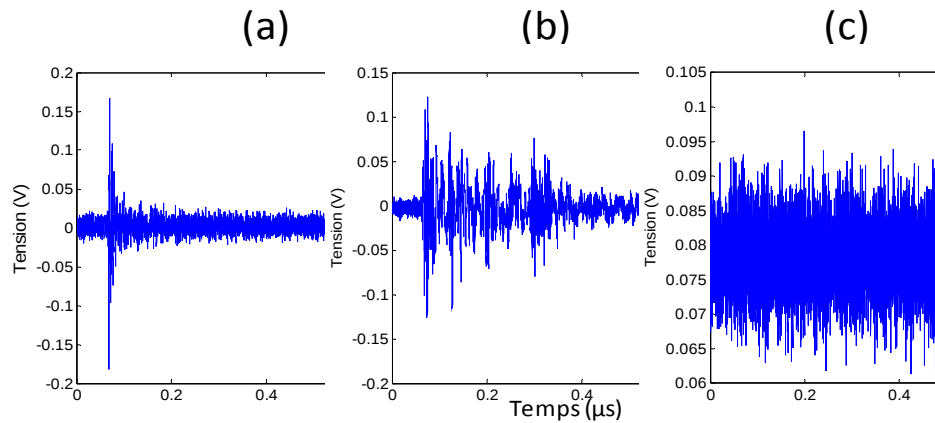


Fig. 2. 22. Événement EM transitoire mesuré par l'oscilloscope (a), événement EM transitoire avec répétition (b) et une perturbation EM permanent (c)

La Fig. 2. 22. (a) correspond à un événement transitoire mesuré sur l'antenne GSM-R droite, la Fig. 2. 22. (b) correspond à un événement transitoire suivi par des événements transitoires entretenus et à répétition.

La Fig. 2. 22. (c) correspond à un bruit EM permanent dont l'amplitude maximale enregistrée est supérieure à 20 mV.

Les graphes tels que ceux de la Fig. 2. 22. donnent les formes d'onde des signaux EM transitoires, observés à bord d'un train en mouvement, mesurés par l'oscilloscope numérique à la sortie d'une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit du train à une distance approximative de 30 mètres par rapport au pantographe.

Ces graphes permettent aussi d'observer l'étalement temporel des signaux transitoires ainsi que leurs amplitudes crêtes.

Cependant, ces informations temporelles ne peuvent pas donner une information sur l'étalement spectral des bruits EM transitoires et les niveaux de bruit EM qu'ils génèrent sur les bandes de fréquence qu'ils peuvent couvrir. Ainsi, les informations extraites d'une caractérisation temporelle ne peuvent pas être comparées aux niveaux de perturbations EM fournis par les normes CEM relatives au domaine ferroviaire qui sont donnés en fonction de la fréquence.

Pour ce faire, il faut transformer les résultats des mesures temporelles des événements EM transitoires dans le domaine fréquentiel, afin de pouvoir comparer leurs spectres aux niveaux limites d'émission EM autorisés par les normes CEM.

Cette transformation nécessite un post traitement complexe des résultats de mesures temporelles.

Ce post traitement sera décrit dans la partie 3.2 de ce chapitre.

On se propose dans la suite de comparer les résultats obtenus par la méthode de caractérisation fréquentielle en employant le protocole de mesure basé sur l'utilisation de la

fonction « Maxhold » décrit précédemment, avec les résultats de mesures obtenus par la méthode de caractérisation temporelle après l'application du post traitement nécessaire à leur transformation dans le domaine fréquentiel.

La validation de la méthode fréquentielle pour la caractérisation des perturbations EM transitoires vues par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement, peut être obtenue si elle donne des résultats de mesures comparables à ce qu'on peut observer par la méthode temporelle.

Dans la suite on décrit les différentes étapes relatives au post traitement appliqué sur les fichiers temporels pour les transformer dans le domaine fréquentiel.

3.2. Post traitement appliqué sur les mesures temporelles

Afin de comparer les résultats de mesure obtenus par les deux méthodes de caractérisation, il faut procéder en deux étapes.

Dans la première étape il faut transformer les signaux temporels dans le domaine fréquentiel et les représenter sur la même bande de fréquence que celle utilisée par l'analyseur de spectre. Dans la seconde étape il faut appliquer aux amplitudes des spectres obtenus lors de la première étape, un algorithme permettant de simuler la fonction « MaxHold » réalisée par l'analyseur de spectre ; ce travail sera réalisé à l'aide d'un calculateur numérique

3.2.1. Passage du domaine temporel vers le domaine fréquentiel

Pour transformer un signal mesuré dans le domaine temporel vers le domaine fréquentiel, on peut utiliser la Transformée de Fourier (TF) continue pour un signal analogique continu ou la Transformée de Fourier Discrète pour un signal échantillonné.

La partie suivante rappelle quelques points importants sur la Transformée de Fourier des signaux temporels.

- Rappel

La Transformée de Fourier d'un signal analogique $x(t)$ qu'on notera ici $X(f)$ s'écrit sous la forme donnée par l'équation .2. 1:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad 2. 1.$$

Avec f la variable fréquence.

$X(f)$ est une grandeur complexe qui peut être exprimée selon son module et son argument comme donné par l'équation .2. 2. suivante :

$$X(f) = |X(f)| \exp(j\theta(f)) \quad 2. 2.$$

Les signaux analogiques mesurés par l'oscilloscope numérique sont des signaux discrets et échantillonnés avec une fréquence d'échantillonnage notée f_e qui respecte le critère de Shannon décrit plus haut.

Un signal analogique échantillonné s'écrit :

$$\begin{aligned}x^*(t) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(kT_e)T_e\delta(t - kT_e) \\ &= x(t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} T_e\delta(t - kT_e)\end{aligned}\tag{2. 3.}$$

Avec $x^*(t)$ est la fonction échantillonnée de $x(t)$

δ est la fonction de Dirac

$T_e = 1/f_e$ est appelée période d'échantillonnage, sa présence permet de compenser la dimension de δ

k est une variable muette

La TF de $x^*(t)$, appelée Transformée de Fourier Discrète (TFD), est notée $X^*(f)$ et s'écrit :

$$\begin{aligned}X^*(f) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(f - kf_e) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(kT_e)T_e \exp(-j2\pi kT_e f)\end{aligned}\tag{2. 4.}$$

$X^*(f)$ correspond à une répétition de $X(f)$ avec une période f_e .

Généralement, la mémoire des calculateurs est finie et on ne peut pas calculer des sommes sur des intervalles infinis.

La méthode utilisée consiste donc à tronquer les signaux analogiques avant de les traiter par une méthode de fenêtrage appropriée.

La fenêtre la plus simple utilisée pour tronquer un signal temporel infini est la fenêtre rectangulaire d'une longueur N . Le signal s'écrit alors :

$$x_N^*(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_e)T_e\delta(t - kT_e)\tag{2. 5.}$$

$$= x(t) \sum_{k=0}^{N-1} T_e \delta(t - kT_e)$$

$x_N^*(t)$ est le signal temporel numérique tronqué par une fenêtre rectangulaire de longueur N et sa Transformée de Fourier notée $X_N^*(f)$ s'écrit sous la forme donnée par l'équation 2. 6.:

$$X_N^*(f) = X(f) * T_e \frac{\sin \pi N T_e f}{\sin \pi T_e f} \exp[-j\pi(N-1)T_e f] \quad 2. 6.$$

Donc

$$X_N^*(f) = X(f) * W_N(f) \quad 2. 7.$$

$$\text{Avec } W_N = T_e \frac{\sin \pi N T_e f}{\sin \pi T_e f} \exp[-j\pi(N-1)T_e f] \quad 2. 8.$$

La convolution fréquentielle due à la troncature temporelle par une fenêtre rectangulaire se manifeste par un étalement spectral de chaque composante fréquentielle sur l'intervalle $[0, f_e]$. Cet étalement spectral est appelé trainage (appelé « Leakage » en anglais).

De cet étalement fréquentiel résulte une dégradation de la résolution fréquentielle du spectre.

En effet, deux composantes fréquentielles consécutives de $X(f)$ distantes de moins de $\frac{1}{NT_e}$ (appelé résolution spectrale) seront mélangées.

Dans quelques cas, on pondère la troncature temporelle par une fenêtre de « Hanning », « Hamming », ou « Blackmann »...etc. qui peuvent permettre selon le signal temporel qu'on veut étudier de réduire les problèmes liés à la résolution spectrale rencontrés avec les fenêtres rectangulaires. [II-4].

Ces fenêtres ne seront pas présentées dans ce manuscrit.

Dans le cadre de ce travail, on veut déterminer les caractéristiques spectrales des événements EM transitoires collectés par l'oscilloscope numérique connecté à une antenne GSM-R fixée à bord d'un train en mouvement. Pour cela, il faut utiliser la TFD pour obtenir le spectre des événements transitoires collectés par l'oscilloscope.

Deux questions se posent alors :

Qu'elle est la durée de la troncature temporelle à appliquer sur l'événement transitoire ?

Quel type de fenêtre de pondération faut-il utiliser ?

D'après Catherine CATZ, dans son article « Analyseurs de Fourier » [II-4] tout signal transitoire possède par définition un début et une fin, donc une énergie finie.

L'article se base sur le principe de conservation d'énergie de la TFD pour montrer que la meilleure troncature temporelle des événements transitoires est celle qui contient au plus la totalité du transitoire.

En effet, la conservation d'énergie des événements transitoires entre le domaine temporel et le domaine fréquentiel, implique que l'augmentation de la résolution fréquentielle (donc augmentation de la taille N de la troncature) des spectres des événements transitoires a pour conséquence la réduction de la dynamique et la précision des amplitudes spectrales.

Donc pour obtenir le spectre d'un signal transitoire mesuré, il suffit de lui appliquer la TFD sur sa durée totale.

C. CATZ montre dans son article que la fenêtre rectangulaire est la plus adaptée pour la pondération des troncatures temporelles réalisées sur les événements transitoires.

On note ici qu'on peut aussi utiliser d'autres types de fenêtre de pondération pour tronquer les signaux transitoires dans quelques cas particuliers qui n'entrent pas dans le cadre des études présentées dans ce manuscrit.

Pour les événements transitoires collectés durant la campagne de mesure A, on essayera dans la suite de les tronquer sur des durées équivalentes à leur étalement temporel. L'étalement temporel étant la durée qui sépare le début et la fin de chaque événement transitoire.

L'étalement temporel de chaque événement transitoire étant variable, le choix de la durée de chaque troncature sera donc arbitraire et sera choisie selon les événements transitoires collectés.

La Fig. 2. 23. présente un exemple d'événements collectés par l'oscilloscope numérique avec des fenêtres temporelles de 500 ns, sous la configuration décrite sur la Fig. 2. 21.

Le choix de travailler sur des fenêtres temporelles de 500 ns a été fait lors de la campagne de mesure après plusieurs essais.

Le Trig level a été fixé à 60 mV sur les dix minutes de mesure.

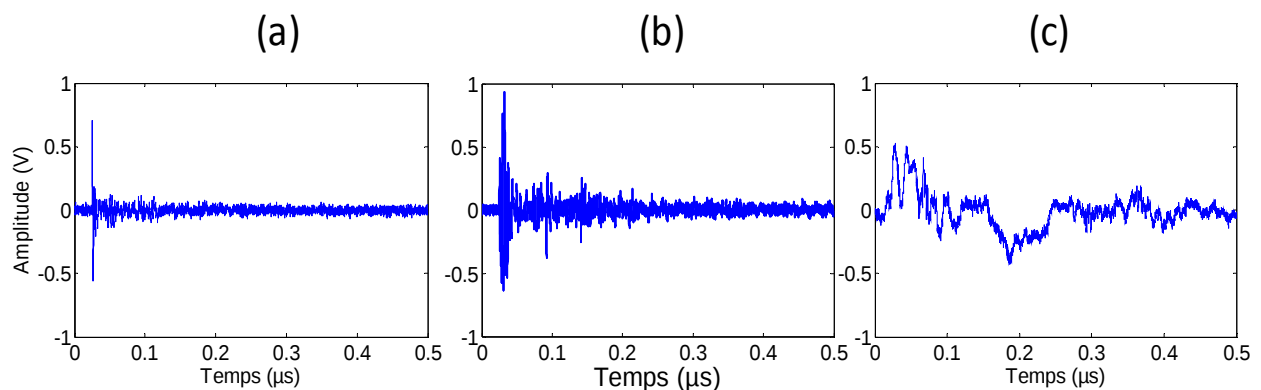


Fig. 2. 23. Exemple d'événements transitoires collectés par l'oscilloscope sous une électrification de 25000 V AC 50 Hz avec un Trig level fixé à 60 mV

La Fig. 2. 23. (a) donne la forme d'onde d'un événement transitoire observé sur l'antenne droite. L'étalement temporel de cet événement transitoire est de l'ordre de 50 ns.

On pourrait donc penser faire la TFD de cet événement transitoire en appliquant une troncature temporelle de 50 ns.

La Fig. 2. 23. (b) donne la forme d'onde d'un événement transitoire qui apparaît avec des rebonds consécutifs au transitoire principal. Ces rebonds de faible amplitude qui apparaissent à la suite du transitoire principal doivent être aussi considérés lors de l'application de TFD sur ce type de signaux. Ces rebonds, malgré leurs faibles amplitudes crête, peuvent générer des perturbations EM très large bande qui peuvent couvrir les bandes de fonctionnement du système GSM-R avec des niveaux de bruit qui peuvent être très importants.

Pour prendre en considération ces événements transitoires, il faudrait tronquer ces événements avec des fenêtres rectangulaires de 0.2 μ s.

La Fig. 2. 23. (c) est un événement transitoire particulier rarement rencontré lors des mesures à bord du train. Ce type d'événement apparaît généralement lorsque le conducteur du train procède à une baissée du pantographe, une montée du pantographe ou à un isolement électrique entre le pantographe et les machines de traction par action sur le disjoncteur. Ces événements sont très étalés dans le temps et peuvent avoir des caractéristiques spectrales particulières qui doivent être caractérisées.

On a donc fait le choix d'effectuer la TFD des événements transitoires collectés en utilisant des fenêtres rectangulaires avec des durées de 0.5 μ s.

Les TFD des fenêtres temporelles enregistrées ont été effectuées en utilisant la fonction FFT (Fast Fourier Transform) de Matlab.

Cette fonction FFT utilise des algorithmes spécifiques qui permettent de réduire la complexité et les temps de calculs par rapport à l'algorithme traditionnel de calcul de la TFD.

Généralement, la FFT transforme la TFD sous la forme d'un produit d'une matrice carrée et d'une matrice ligne.

En effet, la Transformée de Fourier Discrète peut s'écrire comme suit :

$$X(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i)w_N^{i,k} \quad 2. 9.$$

Avec $X(k)$ est une notation pour le spectre échantillonné de $x^*(t)$.

$x(i)$ est une notation simplifiée de $x^*(t)$.

$$w_N^{i,k} = \exp(-j2\pi ki/N)$$

$X(k)$ peut donc s'écrire sous la forme d'un produit d'une matrice ligne x et d'une matrice carré w_N .

La matrice ligne, correspond aux échantillons collectés par l'oscilloscope du signal mesuré et la matrice carrée est de dimension $N \times N$.

Pour profiter des avantages de précision et de rapidité de l'algorithme de la FFT, N doit s'écrire sous la forme 2^n .

Dans le cas de cette campagne de mesure, l'oscilloscope enregistre les signaux transitoires sur des fenêtres de 10000 points. Le calcul de la FFT sera donc réalisé en utilisant un « $n=13$ », soit des fenêtres temporelles de longueur 8192 points (soit de l'ordre de 0.4 μ s).

Les spectres des signaux transitoires dont l'amplitude est présentée sur la Fig. 2. 24. ont été réalisés en utilisant l'algorithme FFT du logiciel Matlab avec des fenêtres rectangulaires de 8192 points. La FFT étant une fonction qui suppose la périodicité de la fenêtre temporelle étudiée, l'algorithme qu'on a utilisé procède donc à une correction des amplitudes spectrales calculées afin de prendre en compte le fait que chaque événement transitoire étudié est non périodique. Cette correction consiste principalement à ajuster la puissance moyenne du spectre calculé du transitoire.

Les graphes (a), (b) et (c) de la Fig. 2. 24. correspondent respectivement aux amplitudes spectrales des événements transitoires présentés par les graphes (a), (b) et (c) de la Fig. 2. 23. sur la bande 300 MHz – 1000 MHz.

Ces graphes montrent que les événements transitoires observés dans le domaine ferroviaire couvrent facilement les bandes de fréquence de fonctionnement du système GSM-R.

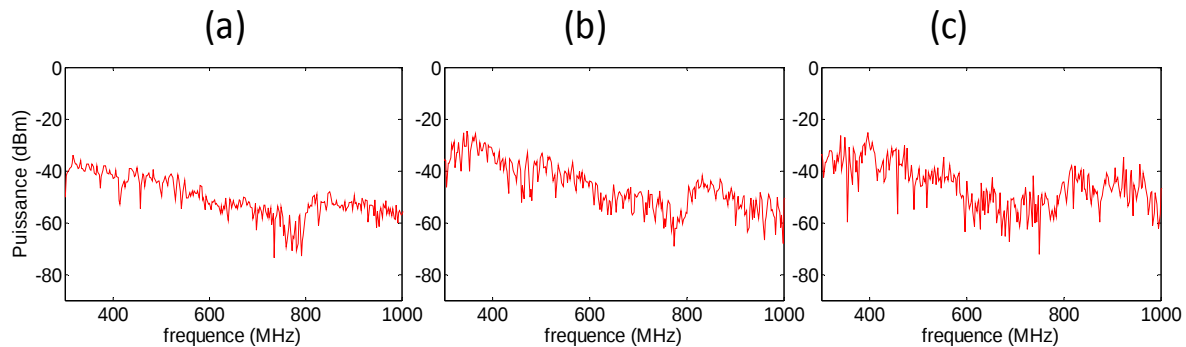


Fig. 2. 24. Amplitude des spectres des événements transitoires en utilisant l'algorithme FFT de Matlab avec l'emploi d'une troncature temporelle de 8192 points

Pour voir l'influence de la largeur des fenêtres rectangulaires utilisées pour tronquer les fenêtres temporelles enregistrées, on présente sur la Fig. 2. 25. les amplitudes spectrales des événements transitoires présentés sur la Fig. 2. 23., en utilisant des fenêtres temporelles plus courtes de 2048 points (soit de l'ordre de $0.1\mu s$), sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

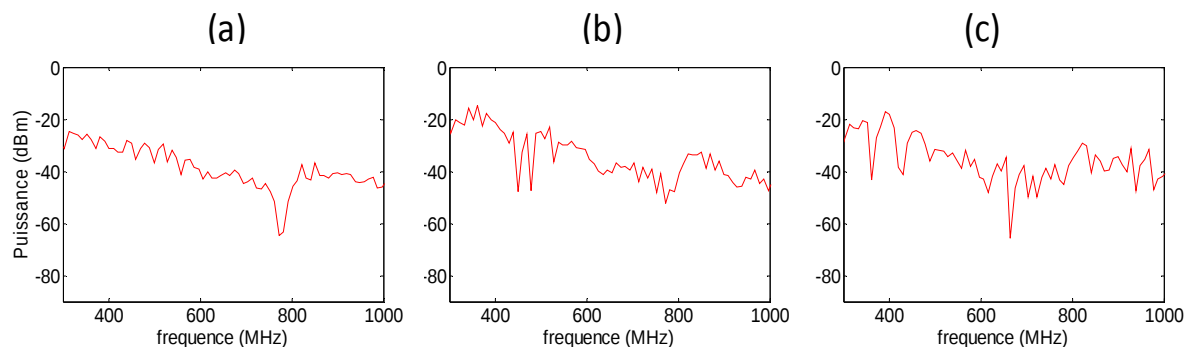


Fig. 2. 25. Amplitude des spectres des événements transitoires en utilisant l'algorithme FFT de Matlab avec l'emploi d'une troncature temporelle de 2048 points

On remarque que la longueur des troncatures temporelles a une influence non négligeable sur la résolution fréquentielle des spectres ainsi que sur les amplitudes spectrales.

Comme prévu, pour les trois signaux présentés ici, on remarque que la réduction de la longueur de la troncature temporelle appliquée sur les signaux de la Fig. 2. 23. se manifeste sur leurs spectres par une réduction de la résolution fréquentielle.

Le choix de la longueur de la troncature temporelle impacte l'amplitude des signaux transitoires collectés à bord du train. On note une différence sur la dynamique d'amplitude avec ces deux troncatures temporelles.

Selon C. CATZ, la meilleure durée est celle qui contient au plus la totalité du transitoire. Vue la grande variété des durées des événements transitoires mesurés, notre choix s'est porté sur l'utilisation de troncatures temporelles de 0.4 μ s. Cette durée a été fixée après plusieurs essais réalisés sur les fenêtres temporelles enregistrées.

3.2.2. Application de l'algorithme « Maxhold »

Cette partie décrit la deuxième étape du post traitement qui permettra de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes de caractérisation de l'environnement ferroviaire.

Un algorithme développé sur le logiciel Matlab permet de lire les spectres obtenus dans la partie 1 et de les comparer deux à deux afin de garder l'amplitude maximale observée pour chaque fréquence de tous les spectres obtenus.

Pour illustrer un résultat obtenu avec cet algorithme, la Fig. 2. 26. présente les amplitudes maximales observées sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz sur les spectres des signaux présentés sur la Fig. 2. 23.

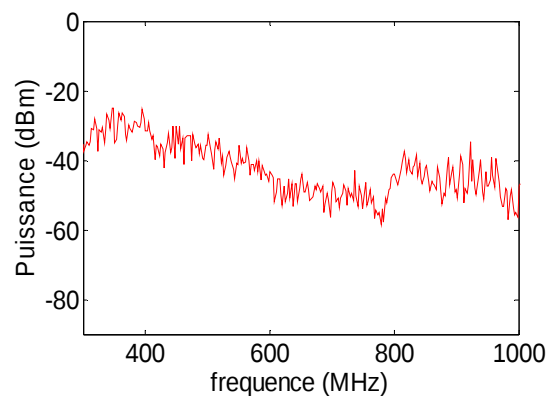


Fig. 2. 26. Puissance maximale obtenue avec l'algorithme « Maxhold » développé

La combinaison des deux étapes de post traitement appliqué sur les événements transitoires mesurés par l'oscilloscope permet d'aboutir à un seul spectre représentant les amplitudes maximales observées sur les bandes de fréquence exploitées durant la totalité du temps de mesure.

Dans la partie suivante on comparera les résultats obtenus par la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel et les résultats obtenus suite à l'application du post traitement

décrit, sur les mesures acquises à l'aide de la méthode de caractérisation dans le domaine temporel.

III. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR LES DEUX METHODES DE CARACTERISATION

1. Description de la configuration de mesure pour comparer les résultats de mesure obtenus par les deux méthodes de caractérisation

Afin de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes de caractérisation, on se propose de mesurer les bruits EM à bord d'un train en mouvement simultanément en utilisant un oscilloscope et un analyseur de spectre connectés chacun à une antenne GSM-R tel que c'est présenté sur la Fig. 2. 27. sous une alimentation de 25000 V AC 50 Hz.

La même configuration a été employée sous une électrification de 1500 V DC.

L'antenne oblique a été connectée sur l'entrée de l'analyseur de spectre et l'antenne droite sur l'entrée de l'oscilloscope.

La bande de fréquence de l'analyseur de spectre a été fixée entre 300 MHz et 1000 MHz avec une bande de résolution RBW = 1MHz, soit un temps de balayage ST = 210 ms.

Le choix d'une bande de résolution assez large a été adopté afin de permettre à l'analyseur de spectre de balayer la bande de fréquence exploitée avec le maximum de rapidité et ainsi augmenter les chances de collecter les composantes fréquentielles des événements EM transitoires par l'analyseur de spectre.

L'analyseur de spectre a été configuré pour utiliser la fonction « Maxhold » et un ordinateur connecté à l'analyseur de spectre via un câble GPIB permet le stockage des spectres affichés sur l'écran de l'analyseur.

Le stockage de l'information a été réalisé toutes les deux secondes, permettant ainsi de collecter l'amplitude maximale de bruit EM observée sur chaque fréquence durant deux secondes.

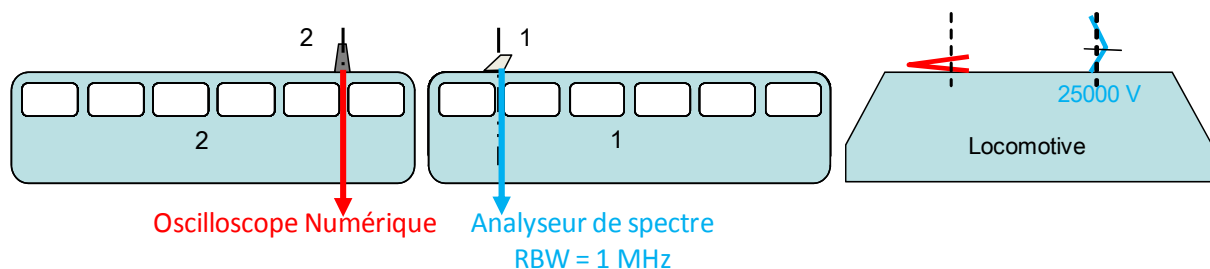


Fig. 2. 27. Configuration de mesures pour comparer entre les deux méthodes de caractérisation sous 25000 V AC 50 Hz

Sous 25000 V, l'oscilloscope numérique a été configuré avec un niveau de déclenchement de 60 mV. Sur les dix minutes de temps de mesure nous avons collecté 137 événements transitoires. Chaque événement a été enregistré sur 0.5 μ s.

La même configuration a été adoptée pour les mesures sous l'alimentation 1500 V DC.

Pour comparer les résultats obtenus par les deux méthodes de caractérisation, il faut que les résultats soient représentés dans le même domaine.

Nous avons donc transformé les fichiers temporels mesurés par l'oscilloscope dans le domaine fréquentiel en utilisant la TFD présentée précédemment.

Les résultats obtenus par la caractérisation temporelle sont traités selon le protocole défini précédemment afin d'aboutir aux amplitudes maximales observées durant les dix minutes de mesure sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

2. Confrontation des résultats

Sous la configuration de mesure présentée Fig. 2. 27., les mesures ont été réalisées en deux étapes :

- 10 minutes de mesure sous 25000 V AC 50 Hz avec un analyseur de spectre et un oscilloscope numérique qui mesurent simultanément les bruits EM qu'observent respectivement l'antenne oblique et l'antenne droite.
- La même mesure a été réalisée sous une électrification de 1500 V DC.

Résultats obtenus par la méthode temporelle

137 fichiers temporels ont été collectés par l'oscilloscope numérique sous 25000 V AC 50 Hz et 8 fichiers temporels ont été collectés sous 1500 V DC.

Ces fichiers ont été dans un premier temps tronqués par des fenêtres temporelles de 0.4 μ s et puis transformés dans le domaine fréquentiel par la fonction FFT du logiciel Matlab. Finalement, l'algorithme MaxHold développé a permis de ressortir l'amplitude spectrale maximale observée sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

Les spectres obtenus sous 25000 V AC 50 Hz et 1500 V DC ont été présentés respectivement par les courbes rouges des Fig. 2. 28. et Fig. 2. 29.

Résultats obtenus par la méthode fréquentielle

Les bruits électromagnétiques observés par l'antenne oblique connectée à l'analyseur de spectre ont été enregistrés toutes les deux secondes avec une bande de résolution de 1 MHz, en utilisant la fonction Maxhold.

Le post traitement présenté dans la partie 2.1. de ce chapitre a été appliqué sur les spectres collectés sous chaque électrification afin d'aboutir à une courbe représentant l'amplitude maximale du bruit électromagnétique mesuré durant les 10 minutes de mesure sur la bande de fréquence 300 MHz – 1000 MHz.

Les spectres obtenus par la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel sous 25000 V AC 50 Hz et 1500 V DC sont présentés respectivement par les courbes bleues de la Fig. 2. 28. et la Fig. 2. 29.

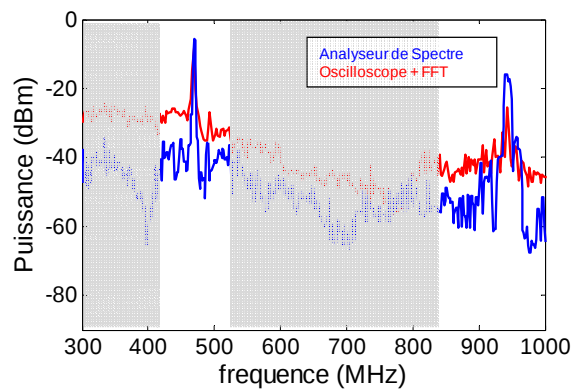


Fig. 2. 28. Comparaison entre les résultats obtenus avec un analyseur de spectre et la FFT des signaux détectés par l'oscilloscope pour le même trajet (électrification : 25 kV 50 Hz AC)

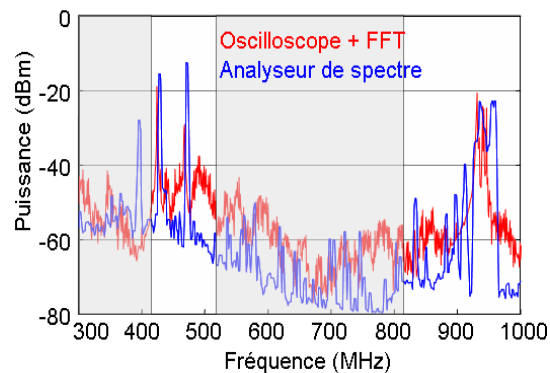


Fig. 2. 29. Comparaison entre les résultats obtenus avec un analyseur de spectre et la FFT des signaux détectés par l'oscilloscope pour le même trajet (électrification : 1.5 kV DC)

Les deux antennes n'ayant pas un comportement comparable sur toute la bande de fréquence exploitée, les zones d'ombre couvrent les bandes de fréquence sur lesquelles les résultats donnés par les deux antennes ne sont pas comparables.

Comme cela a été présenté précédemment les bandes de fréquence sur lesquelles les deux antennes peuvent être considérées comparables sont 420 MHz – 520 MHz et 820 MHz – 1000 MHz.

La résolution fréquentielle du spectre mesuré par l'analyseur de spectre est de l'ordre de 1.4 MHz.

La résolution fréquentielle baisse à 2.4 MHz pour les spectres obtenus par application de la FFT des résultats observés par la méthode temporelle.

Lorsque l'on observe les résultats sur toute la bande de fréquence de comparaison, un accord relativement satisfaisant est obtenu entre les deux approches. En revanche, en se focalisant sur une bande de fréquence étroite, on peut observer des écarts significatifs entre les courbes. Par

exemple, sur la bande de fréquence 420 MHz et 520 MHz, en dehors des pics de bruit EM permanent observés à 420 MHz et 460 MHz, la contribution des événements transitoires est prépondérante et les niveaux de bruit enregistrés par la méthode temporelle sont plus élevés que ceux observés par la méthode fréquentielle.

En effet, la méthode temporelle associée à un post traitement basé sur la méthode du « MaxHold » peut donner un niveau de bruit EM très élevé : dans le cas où un seul événement transitoire apparaît au cours du temps de la mesure avec une amplitude spectrale très élevée par rapport à la majorité des événements transitoires observés, l'utilisateur n'observera alors que l'amplitude de bruit EM correspondant à un seul instant très bref sur un long trajet, alors que l'analyseur de spectre ne conservera qu'une petite partie du spectre de cet événement transitoire, puisque la durée de ce dernier est très courte par rapport au temps de balayage ST.

D'un autre côté, le spectre obtenu à l'aide de l'analyseur de spectre sous 25000 V AC (présenté par la ligne bleue de la Fig. 2. 28.) est plus lisse que celui obtenu par le même analyseur sous 1500 V DC (présenté par la ligne bleue de la Fig. 2. 29.).

Ceci peut être expliqué par un raisonnement basé sur le nombre d'occurrence des événements transitoires observés sur chaque électrification comme suit :

Si on suppose que l'amplitude spectrale des événements transitoires est supérieure à l'amplitude du bruit permanent, alors chaque fois qu'un événement transitoire apparaît entre la caténaire et le pantographe le spectre enregistré par l'analyseur de spectre comporte une partie de la réponse fréquentielle de ce transitoire.

Ainsi, l'application de la fonction « Maxhold » sur l'ensemble des spectres collectés lors de la mesure permet d'avoir une image du spectre des événements transitoires.

On pense donc que plus le nombre d'occurrences des événements transitoires est élevé plus le spectre obtenu par la méthode fréquentielle utilisant la fonction « Maxhold » est lisse et se rapproche du spectre des événements transitoires issu de la méthode temporelle.

Dans le cas étudié, seuls 8 événements transitoires ont été enregistrés durant 10 minutes sous le réseau 1500 V DC, alors que 137 événements ont été enregistrés sous 25000 V AC durant la même période de temps. Il est donc normal que le spectre obtenu sous 25000 V AC 50 Hz soit plus lisse que celui obtenu sous 1500 V DC.

Comme cela a été dit précédemment, on remarque aussi que les amplitudes spectrales obtenues par la méthode de caractérisation temporelle sont généralement plus élevées que celles obtenues par la méthode de caractérisation fréquentielle.

Il est intéressant de voir l'importance de la bande de résolution de l'analyseur de spectre sur le résultat de la comparaison entre les résultats obtenus par la méthode de caractérisation dans le domaine temporel et la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel.

Pour ce faire, on présente ici les niveaux de bruit EM maximums observés sur 10 minutes par un analyseur de spectre configuré pour faire des mesures sur la bande 300 MHz – 1000 MHz, avec une bande résolution RBW = 100 kHz. Le même protocole que celui employé précédemment a été appliqué afin de déterminer une seule courbe permettant d'avoir les niveaux maximums observés par l'analyseur sur les 10 minutes.

Comme précédemment, ces niveaux sont comparés aux amplitudes maximales des bruits EM observés en même temps par l'oscilloscope sur les 10 minutes de mesure sur la même bande de fréquence.

Les fenêtres temporelles enregistrées ont été traitées comme présenté au-dessus afin de déterminer une seule courbe donnant les niveaux maximums observés sur le temps de la mesure.

Les mesures ont été réalisées sous une électrification alternative de 25000 V AC 50 Hz.

La ligne bleue de la Fig. 2. 30. donne l'amplitude maximale du bruit EM observé durant 10 minutes de mesure par l'analyseur de spectre sur 300 MHz – 1000 MHz.

La ligne rouge de la Fig. 2. 30. donne l'amplitude maximale des bruits EM vus entre 300 MHz – 1000 MHz par l'oscilloscope numérique.

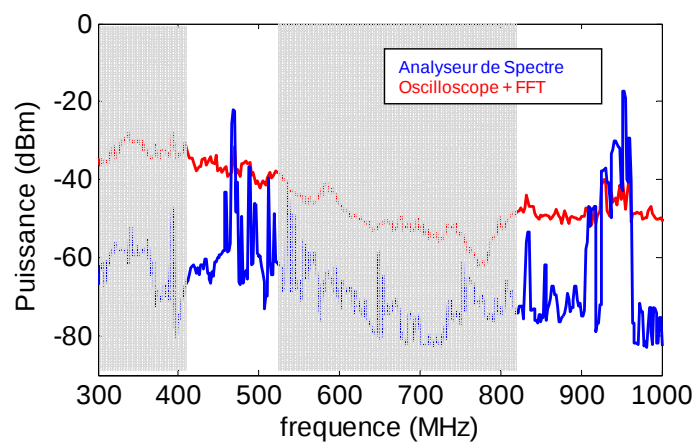


Fig. 2. 30. Comparaison entre les résultats obtenus avec un analyseur de spectre configuré avec un RBW = 100 kHz et la FFT des signaux détectés par l'oscilloscope sur 10 minutes (électrification : 25 kV AC 50 Hz)

Cette courbe montre une grande différence entre les spectres obtenus par l'analyseur de spectre configuré avec une bande de résolution de 100 kHz et les spectres obtenus à la suite du post traitement appliqué aux fenêtres temporelles enregistrées par l'oscilloscope.

On remarque un écart important sur toute la bande entre ces deux courbes, cet écart est largement réduit pour des mesures réalisées dans les mêmes conditions mais en utilisant un analyseur de spectre configuré avec un RBW = 1 MHz, comme le montre la Fig. 2. 28.

Ceci confirme l'importance de l'utilisation d'une large bande de résolution avec l'analyseur de spectre pour la caractérisation d'un environnement EM dans lequel on observe des événements transitoires tel que l'environnement EM ferroviaire. Comme cela a été dit précédemment, l'augmentation du RBW de 100 kHz à 1 MHz réduit la durée de balayage de bande de fréquence exploitée par l'analyseur de spectre. Ainsi, à RBW élevé à chaque apparition d'un événement transitoire entre la caténaire et le pantographe, on a plus de chance de capter une partie de ses composantes spectrales comparé à l'utilisation d'un RBW de 100 kHz. Le spectre obtenu à l'aide de la méthode fréquentielle en utilisant un analyseur de

spectre programmé avec un $RBW = 1 \text{ MHz}$ sera donc plus proche du spectre réel des événements transitoires comparé à celui obtenu avec un $RBW = 100 \text{ kHz}$.

Remarques :

- On rappelle ici que ces mesures (réalisées sous deux électrifications différentes) ont été réalisées avec des pantographes et des caténaires différents et sur des zones géographiques différentes qui peuvent avoir un impact sur les mesures obtenues sous ces deux électrifications.

- En comparant les courbes obtenues sur la Fig. 2. 28. et la Fig. 2. 29., on remarque que les amplitudes des bruits EM mesurées selon la méthode de caractérisation dans le domaine temporel et la méthode de caractérisation dans le domaine fréquentiel montrent que les niveaux de bruit EM reçus par les antennes GSM-R sous 25000 V AC 50 Hz sont généralement supérieurs aux niveaux de bruits générés sous 1500 V DC sur la majorité de la bande de fréquence exploitée. Ceci confirme le résultat de mesure présenté sur la Fig. 2. 19.

Par contre, il est intéressant de rappeler que les niveaux de bruit EM obtenus par l'utilisation de la fonction « Maxhold » peuvent correspondre à un niveau de bruit mesuré sur la durée d'apparition d'un seul événement transitoire particulier dont l'amplitude spectrale est très élevée par rapport au reste des événements EM transitoires collectés durant toute la mesure.

Sachant que la récurrence des événements EM transitoires est très élevée sous 25000 V AC 50 Hz par rapport à une électrification de 1500 V DC, il est donc plus probable d'avoir des amplitudes de champ EM plus élevées sous 25000 V AC 50 Hz avec l'application du « Maxhold » sur les mesures obtenues. Ceci peut expliquer l'amplitude élevée observée sous 25000 V AC 50 Hz.

Pour vérifier réellement l'influence de l'électrification sur les amplitudes de bruit EM généré sur la bande de fonctionnement du système GSM-R, on compare les amplitudes maximales générées sur la bande de fréquence [876 – 880] MHz par 285 événements EM transitoires enregistrés sur chaque électrification sur la Fig. 2. 31.

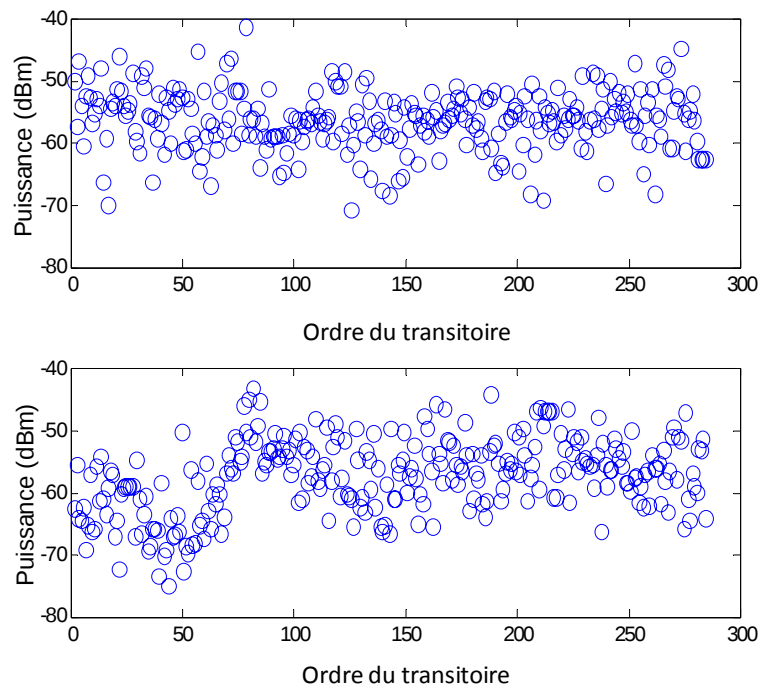


Fig. 2. 31. Amplitude maximale générée par 285 événements EM transitoires sur la bande [876- 880] MHz sous 1500 V DC (figure du haut) et sous 25000 AC 50 Hz (figure du bas)

Chaque point de la figure du haut donne l'amplitude maximale générée par chaque événement EM transitoire enregistré sous 1500 V DC et les points présentés sur la figure du bas donnent les amplitudes maximales générées par les 285 événements EM transitoires sur la bande de fréquence [876 – 880] MHz sous 25000 V AC 50 Hz.

Cette figure montre que dès lors que l'on collecte le même nombre d'événements transitoires, les amplitudes maximales enregistrées sur la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R sont comprises entre -70 dBm et -40 dBm quelque soit l'électrification sous laquelle circule le train.

- L'importance du nombre des événements transitoires sous une alimentation alternative peut s'expliquer par le fait que sous une alimentation continue on utilise une caténaire composée de deux câbles électriques parallèles alors qu'une caténaire utilisée sous un réseau alternatif est composée d'un seul câble électrique. Ceci implique une stabilité mécanique plus importante de la caténaire utilisée sous un réseau continu par rapport à une caténaire utilisée sous un réseau alternatif.

En effet, sous une alimentation continue, les courants consommés sont généralement plus élevés que ceux consommés sous une alimentation alternative. L'importance du courant consommé sous l'alimentation continue implique des sections de câbles importantes. Pour éviter l'utilisation de caténaires à large section, donc lourdes, on répartit le courant consommé par le train sur deux câbles électriques.

On pense que la stabilité mécanique offerte par ce type de caténaire réduit sensiblement le risque de mauvais contact entre la caténaire et le pantographe. On pense que ceci joue un rôle

important sur la réduction du nombre d'occurrences des événements transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe sous 1500 V DC comparé à une caténaire formée par un seul conducteur électrique utilisée sous une alimentation 25000 V AC 50 Hz.

IV. ANALYSE ET CRITIQUE DE CES RESULTATS POUR ETUDIER L'IMMUNITÉ DU SYSTEME GSM-R PAR RAPPORT A CET ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

Les niveaux de bruit mesurés à la sortie des antennes GSM-R proviennent principalement des perturbations permanentes ou transitoires.

Au vu des résultats obtenus par la méthode de caractérisation fréquentielle et la méthode temporelle, on se propose ici de faire une critique de l'usage de chacune de ces méthodes en vue d'une étude de l'immunité du système GSM-R.

1. Perturbations électromagnétiques permanentes qui peuvent agir sur l'immunité du système GSM-R

Les perturbations électromagnétiques permanentes qui peuvent avoir une influence sur l'immunité du système GSM-R sont les perturbations qui couvrent les bandes de fréquence du lien montant et du lien descendant du système GSM-R.

A travers les études menées précédemment dans ce chapitre, on pense que la méthode fréquentielle est la méthode la plus appropriée pour caractériser les perturbations EM permanentes qui agissent sur la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R.

En effet, lorsqu'on caractérise ce type de perturbation EM par la méthode fréquentielle, les niveaux de bruit mesurés sur la bande GSM-R sont souvent plus élevés par rapport aux niveaux obtenus par une méthode de caractérisation temporelle. Ceci est dû au fait que pour la caractérisation fréquentielle, la mesure du bruit se fait en continu sur toute la durée d'un trajet ferroviaire, alors que la caractérisation temporelle ne permet de mesurer le bruit EM que ponctuellement, lorsque le bruit EM dépasse le niveau de déclenchement « Trig Level » fixé au début de la mesure par l'opérateur.

D'un autre côté, la méthode de caractérisation fréquentielle emploie la fonction « Maxhold » afin d'évaluer les niveaux de bruit EM maximum que le système peut subir le long d'un trajet ferroviaire. Cette technique permet de donner le pire cas auquel le système GSM-R peut être confronté.

Cependant, puisque nous voulons étudier l'immunité électromagnétique d'un système embarqué mobile, on ne peut pas évaluer les bruits électromagnétiques qui apparaissent sur la bande de fréquence du système GSM-R sans les comparer avec le niveau de signal utile GSM-R le long d'un trajet de train (on verra dans le quatrième chapitre que ce niveau peut varier entre -90 dBm et -20 dBm).

Donc ne considérer que le niveau de bruit EM maximum obtenu par la méthode fréquentielle a peu d'intérêt pour l'étude de l'immunité du système GSM-R qu'on cherche à protéger.

2. Perturbations électromagnétiques transitoires qui peuvent agir sur l'immunité du système GSM-R

La méthode la plus appropriée pour caractériser des perturbations EM brèves, telles que les perturbations transitoires observées à bord d'un train en mouvement est la méthode de caractérisation temporelle.

Dans le domaine ferroviaire, les perturbations EM transitoires peuvent être très pénalisantes puisque les FFT de ces événements montrent qu'ils couvrent les bandes de fréquence de fonctionnement du système GSM-R.

Néanmoins, on verra dans la suite de ce manuscrit que l'atteinte apportée par ces perturbations transitoires sur l'immunité du système GSM-R dépend fortement de la fréquence d'apparition de ce type de ces phénomènes. Des études présentées dans le troisième chapitre montrent que les perturbations transitoires peuvent apparaître d'une manière fréquente le long d'un trajet ferroviaire.

De plus, les études présentées précédemment montrent que ces phénomènes transitoires peuvent générer des niveaux de bruit EM très élevés, pouvant être comparables, voire plus élevés que le niveau du signal utile GSM-R sur quelques portions du trajet. Les niveaux de bruit ramenés par les transitoires sur les bandes de fonctionnement du système GSM-R peuvent atteindre jusqu'à -40 dBm.

Par ailleurs, même si les fréquences du système GSM-R sont couvertes avec un niveau important, si cela se produit très ponctuellement, l'atteinte au système GSM-R peut être très limitée.

En effet, et comme cela a été dit dans le premier chapitre, il faut garder à l'esprit que le système GSM-R est un système de télécommunication numérique qui utilise des codes correcteurs d'erreurs et le protocole spécifique Euroradio qui peuvent lui permettre de résister à certaines perturbations électromagnétiques transitoires en corrigeant certaines trames erronées (codes canal) ou en réémettant l'information jusqu'à sa bonne réception (protocole Euroradio). Donc une perturbation EM transitoire qui génère un niveau de bruit EM élevé sur la bande de fréquence du système GSM-R mais avec un taux de répétition faible par rapport au pouvoir correcteur du protocole de communication utilisé par le système GSM-R peut ne pas avoir d'influence sur l'immunité du système GSM-R. Par contre, une perturbation EM transitoire qui génère un niveau de bruit EM faible mais qui apparaît avec un taux de répétition si élevé que les protocoles employés par le système GSM-R ne peuvent le tolérer, alors l'immunité du système GSM-R peut être affectée.

Donc l'immunité du système GSM-R par rapport aux perturbations EM transitoires observées dans le domaine ferroviaire ne peut pas être étudiée d'une manière pertinente en se limitant aux amplitudes de bruit générées par ces événements sur les bandes de fréquence de fonctionnement du système GSM-R.

On ne peut donc pas prédire l'effet de ces bruits transitoires sans avoir fait une analyse plus approfondie de leurs caractéristiques et ce sur un grand nombre d'échantillons.

De plus, ne connaissant pas l'aptitude du système GSM-R à fonctionner correctement face à ce type de perturbations EM lorsqu'elles apparaissent avec un taux élevé de répétition sur des durées importantes sur un trajet complet, il faut donc étudier convenablement ces perturbations EM transitoires afin d'estimer l'immunité du système GSM-R face à ce type de perturbation. Il faut donc non seulement connaître les amplitudes de bruit EM générées par les événements transitoires observés sur les bandes de fréquence de fonctionnement du système GSM-R mais il faut aussi connaître le taux de répétition de ces événements transitoires.

Il est alors nécessaire de se focaliser sur les caractéristiques temporelles de ces transitoires et les étudier convenablement par des méthodes appropriées, d'autant plus que ces caractéristiques peuvent être facilement comparées avec les caractéristiques temporelles du protocole de communication du système GSM-R. On verra dans la suite, que cette comparaison facilite beaucoup notre compréhension de l'impact de ce type de perturbation sur l'immunité du système GSM-R.

En conclusion :

- L'immunité du système GSM-R est à priori dépendante des caractéristiques temporelles des événements transitoires.
 - L'étude de l'immunité du système GSM-R doit se faire en comparant les caractéristiques temporelles des événements transitoires avec les caractéristiques temporelles des protocoles de communication employés par le système GSM-R.
 - Les résultats donnés par la méthode de caractérisation proposée précédemment ne permettent pas de les caractériser suffisamment.
- Il faut donc développer une nouvelle approche permettant d'étudier les caractéristiques temporelles de ces événements transitoires en vue d'estimer leurs influences sur l'immunité du système GSM-R.

V. NOUVELLE APPROCHE PERMETTANT LA CARACTERISATION DU BRUIT EM TRANSITOIRE EN VUE D'ETUDIER L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R

La nouvelle méthode qu'on se propose de développer doit permettre d'étudier les caractéristiques intrinsèques (Temps de montée, durée, amplitude crête : ils seront décrits plus en détail dans le chapitre 3) des perturbations EM transitoires ainsi que le taux de répétition de ces événements dans des conditions de fonctionnement normales d'un train.

Pour caractériser les paramètres temporels des événements transitoires, il faut que la méthode de mesure permette d'enregistrer des événements EM transitoires avec une bonne résolution afin de pouvoir étudier leurs caractéristiques temporelles d'une manière précise. La fréquence d'échantillonnage utilisée lors de l'enregistrement de ces événements transitoires doit donc être très supérieure à la fréquence maximale utilisée par le système GSM-R.

Le choix des paramètres temporels à utiliser pour caractériser les événements transitoires doit être fait en gardant à l'esprit que ces paramètres doivent être facilement comparables aux caractéristiques temporelles du protocole GSM-R.

Comme cela a été présenté au premier chapitre, dans un système numérique de télécommunication, l'information est émise sur des trames composées d'un nombre standardisé de bits dont la durée d'émission est fixe.

Le système GSM-R est un système de communication qui utilise l'accès TDMA (Time Division Multiple Acces). Pour chaque canal de communication, l'information est transmise selon le mode d'accès TDMA avec une période de 4.615 ms.

Chaque utilisateur utilise le canal de communication sur un temps appelé « Time Slot » équivalent au huitième de la période TDMA. Le « Time Slot » correspond à 577 μ s.

Sur chaque « Time Slot » 156 bits sont transmis. Le temps de transmission d'un seul bit est de 3.7 μ s.

Les caractéristiques temporelles du protocole de fonctionnement du système GSM-R ainsi que ceux des protocoles Euroradio et code canal doivent être prises en compte dans le choix de la durée temporelle sur laquelle on va estimer le taux de répétition des événements transitoires.

La nature et la durée des signaux de tests qu'on doit développer pour l'étude de l'immunité du système GSM-R doivent aussi tenir compte des différentes caractéristiques temporelles du système GSM-R.

Dans ces travaux on présentera les caractéristiques temporelles des perturbations EM transitoires qui risquent d'être les plus néfastes sur le bon fonctionnement du système GSM-R.

Chapitre 3

Etude des caractéristiques temporelles et d'amplitude des perturbations transitoires

Résumé : Ce chapitre vise à étudier les paramètres temporels et d'amplitude des événements électromagnétiques transitoires observés à bord d'un train par une antenne GSM-R. Après une description des différents paramètres choisis pour la caractérisation des événements transitoires et les bancs de mesure qu'on a utilisés pour accéder à ces paramètres, nous présentons dans la deuxième partie de ce chapitre, une analyse de chaque paramètre temporel et d'amplitude des événements transitoires collectés à bord d'un train. On verra dans cette partie que ces différents paramètres varient sensiblement et d'une manière aléatoire au cours d'un trajet ferroviaire. Ainsi, pour appréhender les variations des caractéristiques temporelles et d'amplitude, nous avons mené une étude statistique de chaque paramètre. Ce travail a permis de les modéliser par des lois statistiques connues. L'impact des conditions d'opération du train sur les caractéristiques statistiques de chaque paramètre a été aussi abordé dans ce chapitre.

Sommaire :

I. CLASSIFICATION DES BRUITS EM RECUS PAR LES ANTENNES GSM-R.....	85
II. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES (TM, DT) ET D'AMPLITUDE CRETE (A) DES EVENEMENTS TRANSITOIRES OBSERVES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT.....	92
III. ETUDE DES INTERVALLES DE TEMPS (IT) QUI SEPARANT LES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES SUCCESSIVES OBSERVEES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT.....	101
IV- ETUDE STATISTIQUE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES ET D'AMPLITUDE DES BRUITS EM TRANSITOIRES RENCONTRES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE	109
V. CONCLUSION.....	134

I. CLASSIFICATION DES BRUITS EM RECUS PAR LES ANTENNES GSM-R

On se focalisera dans ce qui suit sur les bruits EM transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe. Dans cette partie, on présentera les paramètres selon lesquels on a choisi de les classer. On décrira dans la suite les bancs de mesure développés pour accéder à ces paramètres. Les conditions et les configurations de mesure employées seront décrites à la fin de cette partie.

1. Paramètres choisis pour la classification des perturbations EM transitoires reçues par les antennes GSM-R

Généralement, l'immunité des systèmes électriques et électroniques confrontés à des rafales de perturbations EM transitoires rapides est étudiée selon les recommandations données par la norme EN 61000-4-4 [III-1]. Ce standard est aussi la référence utilisée dans les normes ETSI [III-2] pour le test de l'immunité électromagnétique des équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication.

Selon la norme EN 61000-4-4, l'immunité EM des systèmes testés face aux perturbations EM transitoires est réalisée face à des signaux tests définis dans la norme. Ces signaux tests se présentent généralement sous forme de rafales d'événements transitoires. Chaque rafale a une durée prédéfinie et une fréquence de répétition constante selon les amplitudes crêtes des événements transitoires. La Fig.3.1 (c) donne la forme d'onde d'un signal de test composé par deux rafales d'événements EM transitoires.

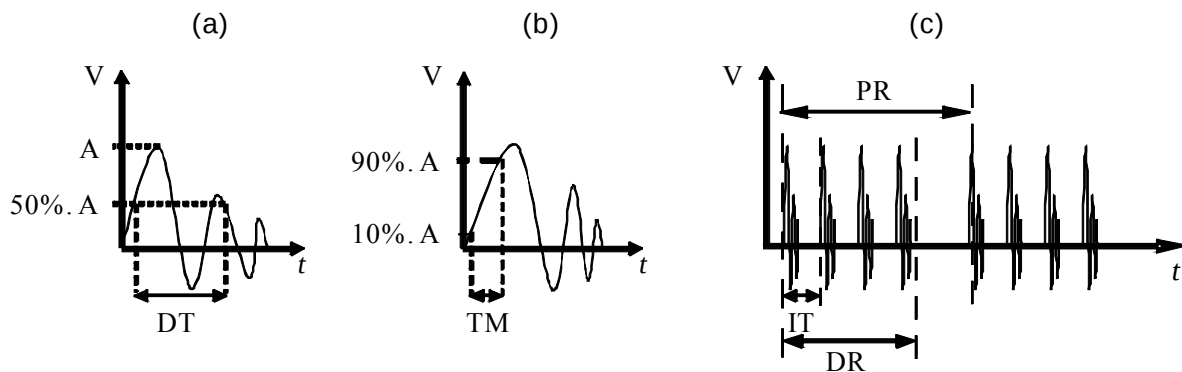


Fig. 3. 1. Définitions des caractéristiques temporelles des signaux transitoires de test telles qu'elles sont définies dans la norme EN 61000-4-4.

Les événements EM transitoires qui composent les rafales de perturbations transitoires présentées par cette norme sont classifiés selon leurs caractéristiques temporelles. La définition de ces caractéristiques temporelles dépend initialement de l'amplitude crête (A) des événements transitoires. En effet, selon l'amplitude crête des événements transitoires qui composent les signaux de test, la norme EN 61000-4-4 définit le Temps de Montée (TM) de ces événements transitoires, la Durée Temporelle (DT) des événements EM transitoires, ainsi

que l'Intervalle de Temps (IT) entre deux événements transitoires successifs qui composent une rafale. Chaque rafale de transitoires est définie par sa Durée (DR) et par sa Période temporelle de Répétition (PR).

Les différentes caractéristiques de ces signaux de test sont présentées sur la Fig. 3. 1.

Sur la Fig. 3. 1. (a) on présente la durée temporelle d'un événement transitoire telle qu'elle est définie dans la norme EN 61000-4-4. Elle correspond à l'intervalle de temps où l'amplitude $V(t)$ de l'événement transitoire est supérieure à 50 % de l'amplitude crête (A) de l'événement transitoire.

Sur la Fig. 3. 1. (b) on présente le temps de montée d'un événement transitoire tel qu'il est défini dans la norme EN 61000-4-4. Il correspond à l'intervalle de temps le plus court sur lequel l'amplitude $V(t)$ de l'événement EM transitoire passe de 10 % de A à 90 % de A.

Sur la Fig. 3.1 (c) on présente les paramètres IT, DR et PR.

Le IT correspond à la période de répétition des événements transitoires dans une rafale. Le paramètre DR définit la durée de cette rafale et le paramètre PR sa période de répétition.

La norme 61000-4-4 donne des valeurs standardisées de chaque paramètre temporel des rafales d'événements EM transitoires. Ces valeurs typiques présentées dans la norme sont comme suit :

TM: 5 ns $\pm$ 30 %

DT: 50 ns $\pm$ 30%

IT: (0.2 ms ou 0.4 ms) selon l'amplitude maximale A des événements transitoires qui composent le signal de test. Avec A maintenu constant sur chaque signal de test.

Ces différentes caractéristiques temporelles peuvent avoir une influence importante sur les bandes de fréquence couvertes par les événements EM transitoires et les amplitudes de bruit EM généré sur ces bandes. Par ailleurs, les valeurs des caractéristiques temporelles des événements transitoires définies dans la norme EN 61000-4-4 ne représentent qu'une partie des perturbations EM transitoires observées par les antennes embarquées du système GSM-R à bord d'un train en mouvement.

De plus, un événement EM transitoire ayant un TM de 5 ns tel qu'il est défini dans la norme EN 61000-4-4 ne couvrira pas nécessairement la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R et ne peut pas être représentatif des événements transitoires observés entre la caténaire et le pantographe à bord d'un train en mouvement. Ainsi, faire des tests d'immunité face aux événements EM transitoires en utilisant les recommandations données par la 61000-4-4 ne permet pas nécessairement d'aboutir à des résultats de tests d'immunité du système GSM-R représentatifs de tout ce qu'il peut subir à bord d'un train en mouvement.

Nous nous sommes donc focalisés sur les caractéristiques temporelles réelles des événements EM transitoires observés par les antennes GSM-R embarquées à bord du train. Ceci permettra notamment de comparer leurs caractéristiques temporelles avec celles du protocole de communication du système GSM-R. De plus, les bandes de fréquence que les transitoires

couvrent et les niveaux de bruit EM qu'ils génèrent sur la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R pourront être estimés avec plus de précision.

On verra dans le quatrième chapitre que l'ensemble de ces paramètres a un impact important sur l'immunité du système GSM-R face aux événements transitoires.

Notre objectif dans ce chapitre étant de classifier les événements EM transitoires observés par les antennes GSM-R fixées à bord d'un train en mouvement en vue d'étudier l'immunité du système GSM-R, on a choisi de les classifier en utilisant les mêmes paramètres que ceux décrits dans la norme EN 61000-4-4, à savoir le TM, la DT, le IT et A.

Ceci, permettra de définir de nouvelles caractéristiques temporelles et d'amplitude de signaux tests adaptés au contexte des systèmes embarqués à bord d'un train en mouvement, tels que le système GSM-R.

2. Bancs de mesure développés pour accéder aux paramètres de classification

Afin d'accéder aux paramètres temporels de classification des événements EM transitoires observés par les antennes GSM-R embarquées, il faut collecter ces événements transitoires en utilisant des bancs de mesure adaptés à chacun de ces paramètres.

Ces derniers peuvent être divisés en deux groupes :

- Les paramètres intrinsèques à chaque événement transitoire isolé, tels que le temps de montée, la durée temporelle et l'amplitude crête.
- Les paramètres temporels des rafales d'événements transitoires, tels que l'intervalle de temps entre deux transitoires successifs, la durée d'une rafale et la période de répétition des rafales.

Pour chaque groupe de paramètres il a donc fallu développer un banc de mesure dédié, permettant d'accéder facilement à chaque paramètre temporel du groupe.

2.1. Banc de mesure développé pour accéder aux paramètres intrinsèques des perturbations électromagnétiques transitoires

Ce banc de mesure doit permettre de collecter un nombre important d'événements EM transitoires afin d'étudier avec précision leurs caractéristiques et s'approcher ainsi d'une caractérisation représentative de leurs paramètres temporels.

La mesure a donc été réalisée à l'aide d'un oscilloscope numérique connecté à une antenne GSM-R embarquée à bord d'un train en mouvement opérant sous des conditions de fonctionnement normales.

L'oscilloscope est configuré pour enregistrer les perturbations transitoires sur des fichiers temporels de 0.2 μ s avec une fréquence d'échantillonnage de $20 \cdot 10^9$ échantillons par seconde.

Ceci permet de caractériser les paramètres temporels (TM et DT) avec une résolution de l'ordre de 50 ps, et par conséquent, l'amplitude crête de chaque événement transitoire avec une très bonne précision.

A cette fréquence d'échantillonnage, la profondeur de mémoire de l'oscilloscope a été fixée pour enregistrer les événements transitoires sur des durées temporelles de l'ordre de 0.2 μ s.

Ce banc de mesure, noté BM 1, est présenté sur la Fig. 3. 2.

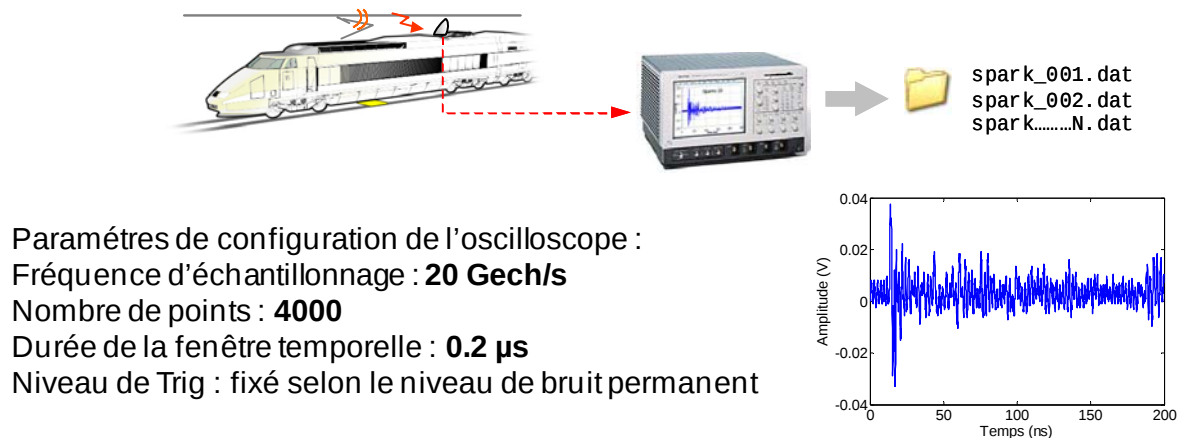


Fig. 3. 2. Banc de mesure pour accéder aux paramètres intrinsèques des événements transitoires

2.2. Banc de mesure développé pour accéder aux paramètres temporels des rafales de perturbations EM transitoires

Dans cette partie, on présente le banc de mesure que nous avons utilisé pour accéder aux intervalles de temps (IT) qui séparent l'apparition des événements transitoires successifs observés à bord d'un train en mouvement.

Le DR et le PR ne seront pas étudiés durant ces mesures. Ces paramètres ne peuvent pas être facilement étudiés d'une manière expérimentale, il faudrait plutôt les déterminer selon les caractéristiques temporelles du protocole de communication utilisé par le système GSM-R. Les durées des rafales ainsi que leur période de répétition seront évoquées avec plus de détails dans le quatrième chapitre de ce manuscrit.

Par ailleurs, l'expérience montre que la méthode de mesure employée sur le BM 1 ne permet pas d'enregistrer tous les événements transitoires successifs qui apparaissent sur un trajet ferroviaire. En effet, la durée d'enregistrement de chaque événement transitoire détecté par l'oscilloscope est généralement très longue par rapport à la période de récurrence de ces transitoires notée IT. Ainsi, nous avons choisi de développer une nouvelle méthode permettant de caractériser le paramètre IT avec une précision plus importante.

Nous avons donc développé un nouveau banc de mesure, appelé BM 2 et présenté sur la Fig. 3. 3., permettant de caractériser IT.

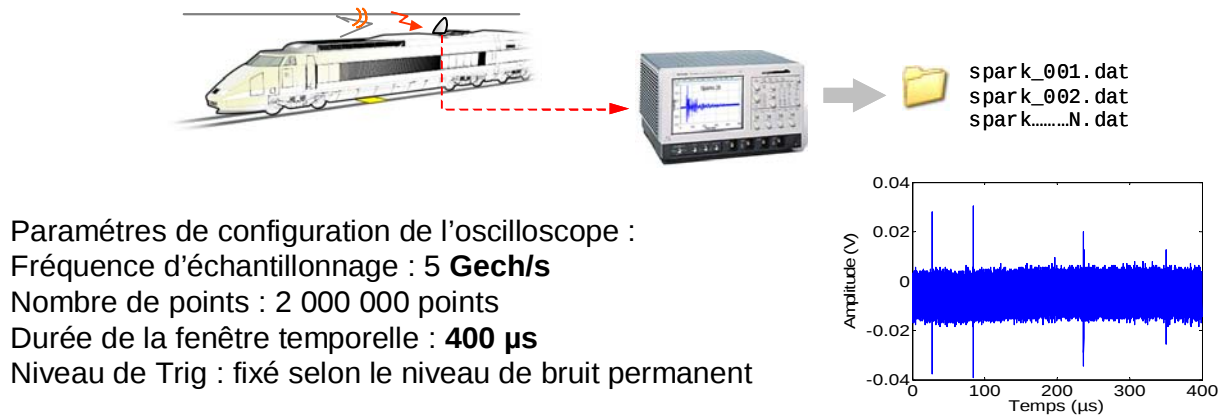


Fig. 3. 3. Banc de mesure pour accéder aux paramètres temporels des rafales de perturbations EM transitoires

L'idée proposée ici, consiste à mesurer des événements EM transitoires avec oscilloscopes numériques disposant d'une profondeur de mémoire importante permettant d'enregistrer les bruits électromagnétiques transitoires sur de longues fenêtres temporelles dont la durée est très grande par rapport aux intervalles de temps qui séparent l'apparition des événements EM transitoires successifs.

Le choix de la fréquence d'échantillonnage utilisée pour l'enregistrement des fichiers temporels nécessite un compromis entre la résolution temporelle de la mesure recherchée et la longueur de la fenêtre temporelle enregistrée. En effet, la profondeur de mémoire des oscilloscopes numériques est généralement constante quelque soit la fréquence d'échantillonnage utilisée. Par conséquent, plus la fréquence d'échantillonnage choisie est petite (faible résolution) et plus la longueur temporelle des fenêtres enregistrées peut être grande. Il faut noter que la longueur temporelle des fenêtres enregistrées est liée à la profondeur de mémoire de l'oscilloscope utilisé.

Notre objectif étant d'étudier l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires, il est intéressant de regarder le nombre d'événements transitoires qui apparaissent sur une durée équivalente au temps d'émission d'un « burst » GSM-R, définie par une durée standard constante de 577 μ s.

On verra que cette donnée est très pertinente pour l'étude de l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires. Plus de détails sur cette étude seront donnés dans le quatrième chapitre.

Concernant la fréquence d'échantillonnage, on sait que la fréquence maximale qui nous intéresse au cours de ces mesures est fixée par la fréquence maximale utilisée par le système GSM-R qui est de l'ordre de 1 GHz, on peut penser fixer la fréquence d'échantillonnage selon le critère de « Shannon », soit à 2 GHz. Cependant, les signaux mesurés à bord d'un train en mouvement sont généralement accompagnés de bruits électromagnétiques d'amplitude élevée qui peuvent masquer ou perturber la mesure des événements transitoires qu'on cherche à capter. On a donc choisi de travailler avec une fréquence d'échantillonnage supérieure à 2 GHz et l'oscilloscope numérique dont on dispose nous permet d'utiliser une fréquence de 5 GHz.

A cette fréquence, la profondeur de mémoire de l'oscilloscope permet d'enregistrer des fenêtres temporelles de 2 Millions de points, soit une durée temporelle équivalente à 400 μ s. Bien que cette durée soit inférieure à la durée d'émission d'un « Burst » GSM-R, on pourra estimer l'intervalle de temps qui sépare les événements EM transitoires successifs observés sur une antenne GSM-R fixée à bord d'un train en mouvement, avec cette fenêtre temporelle. Plus de détails sur la méthode employée pour estimer les intervalles de temps seront donnés dans la suite.

3. Conditions de mesure à bord du train et récapitulatif sur la quantité de données collectée

Afin d'évaluer les paramètres de classification des perturbations EM transitoires observées par les antennes GSM-R à bord d'un train en mouvement, les bancs de mesure présentés précédemment ont été utilisés lors des campagnes de mesure A et B.

Le BM 1 a été utilisé lors des deux campagnes pour enregistrer séparément chaque événement transitoire, apparaissant entre la caténaire et le pantographe, vu à travers une antenne GSM-R. Lors de la campagne de mesure A, le niveau de trig de l'oscilloscope a été généralement de l'ordre de 200 mV et de l'ordre de 20 mV lors de la campagne B.

Le tableau Tab.3. 1. donne la durée des mesures réalisées par le BM 1, les conditions d'opération et le nombre de fichiers temporels collectés sous une électrification de 25000 V AC.

	Campagne de mesure A	Campagne de mesure B
Vitesse de croisière	~ 120 km/h	160 km/h ~ 200 km/h
Durée de la mesure	9 heures et 30 minutes	6 heures et 30 minutes
Nombre de fichiers	3715	63376

Tab. 3. 1. Tableau récapitulatif des résultats obtenus par BM 1 lors des deux campagnes de mesure

Ce tableau montre que la vitesse d'opération des trains a un impact important sur l'occurrence des événements transitoires entre la caténaire et le pantographe. En effet, on remarque qu'une augmentation de l'ordre de 50 % de la vitesse de croisière des trains a multiplié le nombre d'occurrences des événements transitoires de 30 fois sur une même durée de mesure.

Généralement, la raison principale pour expliquer la présence des transitoires entre la caténaire et le pantographe est l'oscillation de la caténaire engendrée par les chocs du pantographe sur les supports de la caténaire lors du passage du train.

Donc à vitesse élevée, on s'attend à ce que les chocs sur la caténaire soient plus forts, et par voie de conséquence, fassent augmenter l'occurrence des événements transitoires.

La caractérisation des intervalles de temps qui séparent l'apparition des événements transitoires successifs a été réalisée en utilisant le BM 2 lors de la campagne de mesure B.

Le tableau Tab.3. 2. donne la durée des mesures réalisées par le BM 2, les conditions d'opération et le nombre de fichiers temporels collectés.

	Campagne de mesure B
Vitesse de croisière	160 km/h ~ 200 km/h
Durée de la mesure	6 heures et 35 minutes
Nombre de fichiers	18376

Tab. 3. 2. Tableau récapitulatif des résultats obtenus par BM 2 lors de la campagne de mesure B

II. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES (TM, DT) ET D'AMPLITUDE CRETE (A) DES EVENEMENTS TRANSITOIRES OBSERVES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT

Les caractéristiques temporelles intrinsèques aux perturbations transitoires sont issues des mesures réalisées sur 100 minutes en utilisant BM 1 avec une antenne GSM-R bi-bande (numéro 2) dont le paramètre de réflexion S_{11} est présenté sur la Fig. 2.12. (b).

Les mesures ont été réalisées sous une alimentation de 25000 V AC 50 Hz sur un trajet de 230 km, avec une vitesse de croisière de l'ordre 160 km/h et des pics de vitesse de 200 km/h.

Le niveau de Trig a été fixé à 20 mV sur le long de ce parcours. Dans les zones urbaines, ce niveau a été légèrement augmenté afin d'éviter l'enregistrement de fenêtres temporelles ne comportant que du bruit EM permanent. En effet, sur ces zones, le niveau de bruit EM est généralement élevé et peut ainsi déclencher de fausses détections de transitoires, lorsque l'amplitude du bruit dépasse le niveau de Trig de l'oscilloscope.

Sur cette mesure, chaque bruit électromagnétique détecté avec une amplitude crête supérieure au ce niveau de Trig a été enregistré par l'oscilloscope avec une fréquence d'échantillonnage de 20 GHz.

Durant les 100 minutes du temps de mesure, l'oscilloscope a enregistré 25700 fichiers temporels. Malgré les précautions prises pour éviter les fausses détections, l'oscilloscope a enregistré des fenêtres temporelles ne comportant aucun événement transitoire. Ces fenêtres ne seront pas considérées lors de l'étude des paramètres temporels des événements transitoires.

Un algorithme a été développé sur MATLAB permettant la lecture de chaque fichier temporel enregistré et le calcul du temps de montée, de la durée et de l'amplitude crête.

Cet algorithme calcule ces paramètres en respectant les définitions données dans la norme EN 61000-4-4 et présentées dans la partie I du chapitre 3.

1. Temps de montée

Le TM des 25700 fichiers temporels enregistrés est donné sur la Fig. 3. 4.. L'axe des abscisses de ce graphe donne l'ordre du fichier temporel et l'axe des ordonnées donne les temps de montée. Chaque point présenté sur cette figure donne la correspondance entre l'ordre du fichier temporel enregistré et son temps de montée.

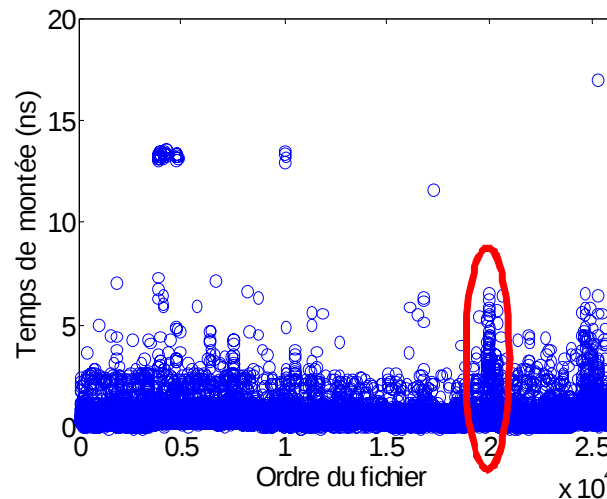


Fig. 3. 4. Temps de montée des fichiers temporels enregistrés

Les temps de montée mesurés sur ces fichiers sont compris entre 0.2 ns et 14 ns. Cependant on remarque que la majorité des fichiers temporels ont un temps de montée inférieur à 2 ns. On précise que 24900 fichiers ont un temps de montée inférieur à 2 ns et seuls 800 ont un temps de montée supérieur et correspondent principalement à du bruit EM permanent.

L'enregistrement de ce type de fichier a été réalisé sur toute la durée du parcours du train (100 minutes). Cependant dans les zones urbaines, vue la multitude des émetteurs d'ondes EM et la proximité des stations de base du système GSM public, on remarque que les niveaux de bruit électromagnétique permanent s'élèvent sensiblement et ceci a pour résultat l'augmentation du nombre de fichiers temporels de bruit permanent enregistrés par l'oscilloscope.

Ce phénomène est facilement remarquable sur les fichiers dont l'ordre d'enregistrement est proche de 20000 ; cette zone a été désignée par un cercle rouge sur le graphe de la Fig. 3. 4. Sur cette zone on voit une forte concentration de fichiers temporels dont le temps de montée est supérieur à 2 ns. Ces fichiers correspondent principalement aux bruits EM permanents observés au niveau de la ville de Saumur, située à 70 km de la ville de Saint Pierre des Corps.

Pour voir avec plus de précision l'étalement temporel des temps de montée des événements transitoires observés par les antennes GSM-R fixées au-dessus du toit d'un train en mouvement, la Fig. 3. 5. présente un zoom de la Fig. 3. 4. sur les temps de montée compris entre 0.2 ns et 2 ns.

Sur la Fig. 3. 5., on remarque que pour des temps de montée inférieurs à 1 ns une forte densité de points est observée. Ceci indique que la majorité des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R ont un temps de montée inférieur à 1 ns.

Lorsqu'on observe les fenêtres temporelles ayant un temps de montée compris entre 1 ns et 2 ns, on remarque que la majorité de ces fenêtres temporelles sont des bruits EM permanents ou la combinaison d'un événement EM transitoire avec un bruit permanent de niveau très supérieur à 10 % de l'amplitude crête de l'événement transitoire. Ce niveau de bruit élevé, introduit un biais sur le calcul du temps de montée réel de l'événement transitoire.

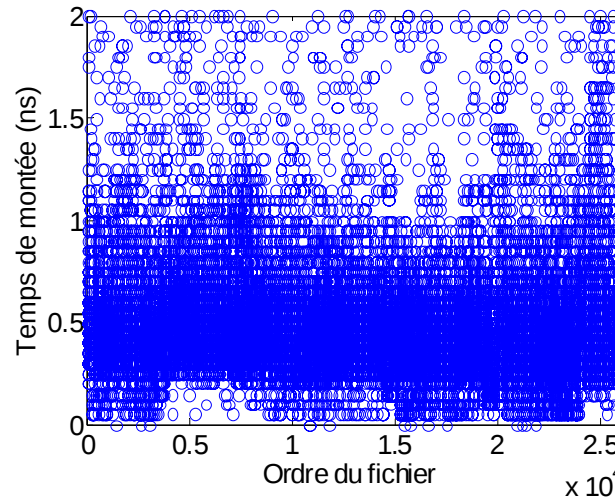


Fig.3. 5. Temps de montée des fichiers temporels enregistrés avec un temps de montée inférieur à 2 ns

On retiendra donc que les événements transitoires détectés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit du train ont des temps de montée compris entre 0.2 ns et 1 ns.

Cependant, il est important de noter le caractère aléatoire des temps de montée sur toute la durée des mesures. En effet, on remarque facilement que les temps de montée des événements EM transitoires observés par l'antenne GSM-R ne sont pas uniformément répartis sur l'intervalle 0.2 ns et 1 ns.

2. Durée temporelle

La Fig. 3. 6. présente la durée temporelle des 25700 fichiers temporels enregistrés pour voir l'étalement des durées temporelles des fichiers enregistrés.

L'axe des abscisses de ce graphe donne l'ordre du fichier temporel et l'axe des ordonnées donne les durées temporelles. Chaque point présenté sur cette figure donne la correspondance entre l'ordre du fichier temporel enregistré et sa durée de temporelle.

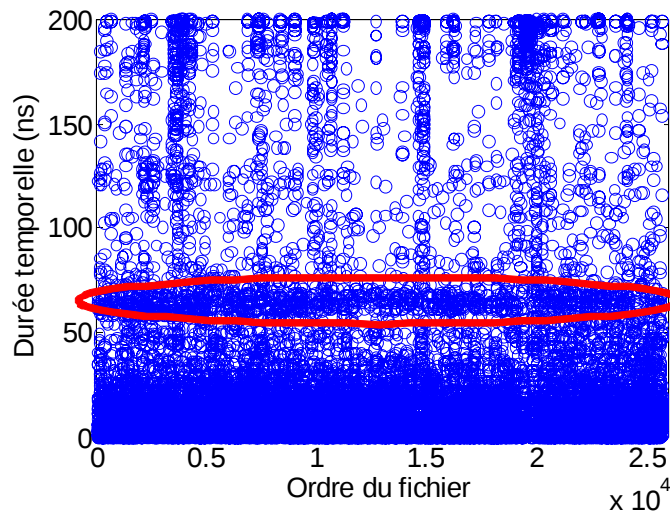


Fig. 3. 6. Durée temporelle des fichiers temporels enregistrés

Les durées temporelles mesurées sur les 25700 fichiers enregistrés sont comprises entre 0.4 ns et 200 ns.

On remarque que quelques fichiers ont une durée temporelle qui est presque égale à la durée totale de la fenêtre temporelle enregistrée.

Cette durée temporelle ne correspond évidemment pas à la durée d'un événement transitoire, mais indique principalement que la fenêtre correspondante comprend exclusivement du bruit EM permanent ou un événement transitoire accompagné d'un bruit EM permanent supérieur à 50 % de son amplitude crête.

Généralement, les fichiers dont la durée calculée est supérieure à 70 ns se trouvent dans ce cas.

On notera aussi que pour plusieurs fichiers temporels enregistrés, la durée temporelle calculée par l'algorithme est comprise entre 50 ns et 60 ns. Cette zone est présentée par un cercle rouge sur la Fig. 3. 6.

Ces fichiers sont composés principalement d'événements EM transitoires qui apparaissent avec une succession d'autres événements transitoires de faibles amplitudes, qu'on appellera « rebond » mais dont l'amplitude crête dépasse 50 % de l'amplitude maximale de l'événement EM transitoire, tels que le fichier 670 dont la forme est présentée sur la Fig. 3. 7. et dont la durée temporelle calculée est de l'ordre de 62 ns.

A ce stade, on ne connaît pas exactement l'origine de ces rebonds qui apparaissent à la suite d'un événement transitoire. Cependant, on pense que ces rebonds sont principalement dûs à un phénomène physique, lié à la nature du plasma formé au moment du décrochage de la caténaire et du pantographe. Ce plasma, pourrait favoriser l'apparition de décharges électriques successives au transitoire principal (dont l'amplitude est la plus élevée).

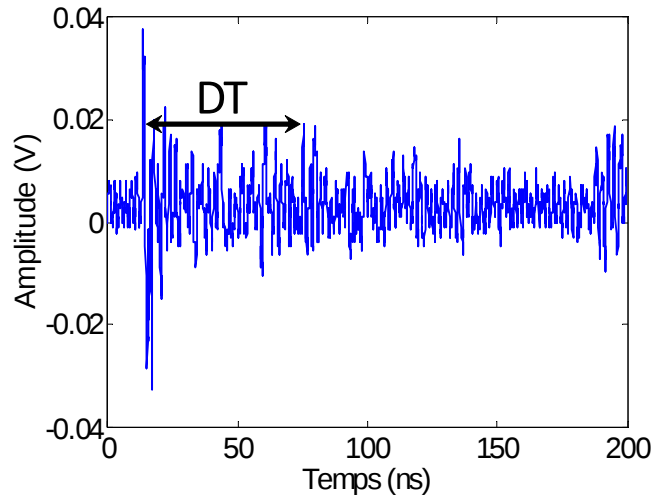


Fig. 3. 7. Forme du signal avec une durée temporelle de 60 ns

La Fig. 3. 8. présente un zoom de la Fig. 3. 6. sur les durées temporelles comprises entre 0.4 ns et 50 ns, pour voir avec plus de précision l'étalement des durées temporelles des événements EM transitoires captés par les antennes GSM-R fixées au-dessus du toit d'un train en mouvement.

La majorité des événements transitoires qui apparaissent sans rebond durant la mesure ont une durée temporelle comprise entre 0.4 ns et 20 ns. On comptabilise 20000 fichiers temporels enregistrés avec une durée temporelle inférieure à 20 ns.

La majorité des fichiers enregistrés avec des durées temporelles supérieures à 20 ns est principalement formée par une succession de deux événements transitoires successifs ou plus. Ces derniers, ont des amplitudes maximales supérieures à 50 % de l'amplitude maximale (A) du fichier enregistré.

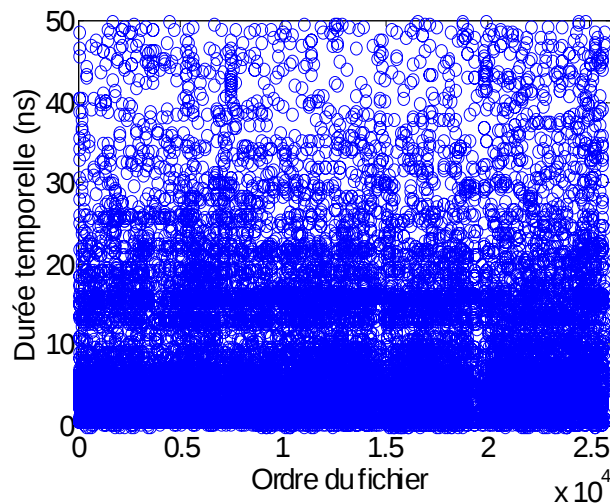


Fig. 3. 8. Durée temporelle des fichiers temporels enregistrés avec une durée temporelle inférieure à 50 ns

Les événements EM transitoires successifs sont différents des rebonds, puisqu'ils apparaissent avec des amplitudes presque aussi élevées que l'amplitude de l'événement EM transitoire principal (le premier).

La Fig. 3. 9. donne des exemples d'une fenêtre temporelle enregistrée dont la durée temporelle est comprise entre 20 ns et 50 ns.

On retiendra donc que la durée temporelle des événements transitoires observés est étalée sur l'intervalle 0.4 ns et 20 ns.

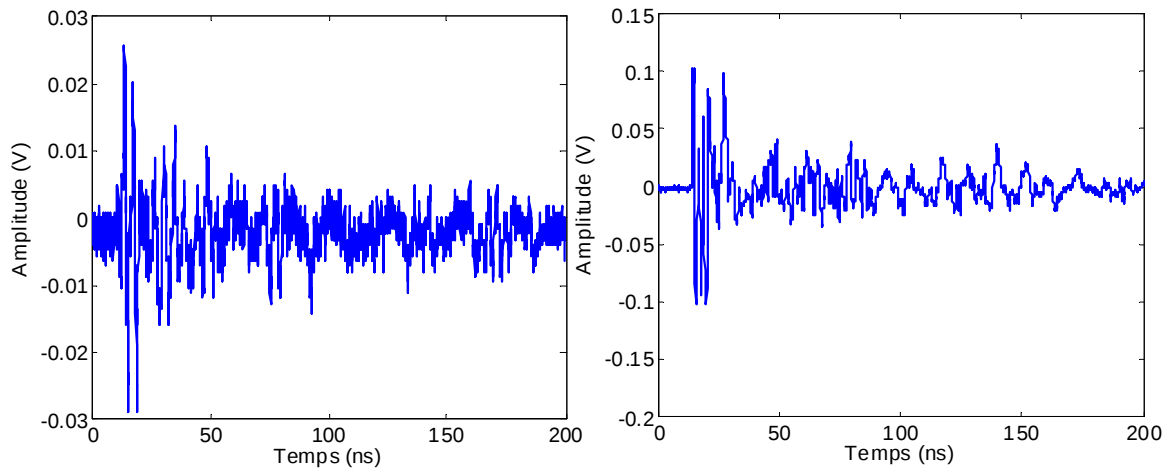


Fig. 3. 9. Événements EM transitoires dont la durée temporelle calculée est comprise entre 20 ns et 50 ns

Cependant, il est important de noter le caractère aléatoire des durées temporelles sur toute la totalité des événements EM transitoires collectés durant la mesure. En effet, on remarque facilement que les temps de montée des événements EM transitoires observés par l'antenne GSM-R ne sont pas uniformément répartis sur l'intervalle 0.4 ns et 20 ns.

3. Amplitude crête (A)

Pour voir l'étalement des amplitudes crête des fichiers enregistrés, on a développé un algorithme permettant de donner les amplitudes crête de chaque événement transitoire enregistré. Cet algorithme permet de calculer exclusivement l'amplitude crête des événements transitoires et filtre automatiquement les fichiers qui ne comportent que du bruit permanent.

Les résultats obtenus sur les 25700 fichiers de mesures, ont montré que seuls 24100 fichiers temporels sont exploitables pour la caractérisation des amplitudes crêtes des événements transitoires.

La Fig. 3. 10. donne l'amplitude crête des 24100 fichiers temporels.

L'axe des abscisses de ce graphe donne l'ordre des événements EM transitoires et l'axe des ordonnées donne l'amplitude crête des événements transitoires. Chaque point présenté sur

cette figure donne la correspondance entre l'ordre des événements transitoires et son amplitude crête.

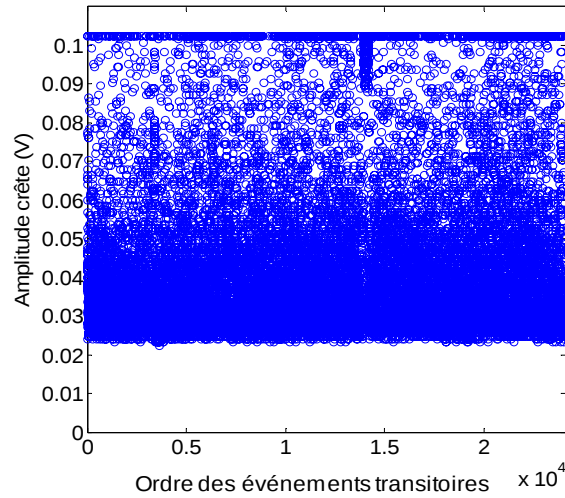


Fig. 3. 10. Amplitude crête des événements EM transitoires enregistrés

La Fig. 3. 10. montre que les amplitudes crêtes des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement sont comprises entre 26 mV et 0.1 V.

Par contre l'amplitude crête maximale enregistrée lors de ces mesures est limitée à 0.1 V. Cette limite est malheureusement fixée par l'échelle maximale de l'oscilloscope. En effet, les événements EM transitoires ayant une amplitude crête maximale supérieure à 0.1 V sont écrêtés et la valeur enregistrée n'est pas représentative de la vraie valeur crête de l'événement transitoire détecté.

La Fig. 3. 11. présente un exemple d'une fenêtre temporelle composée par un signal transitoire écrêté à 0.1 V.

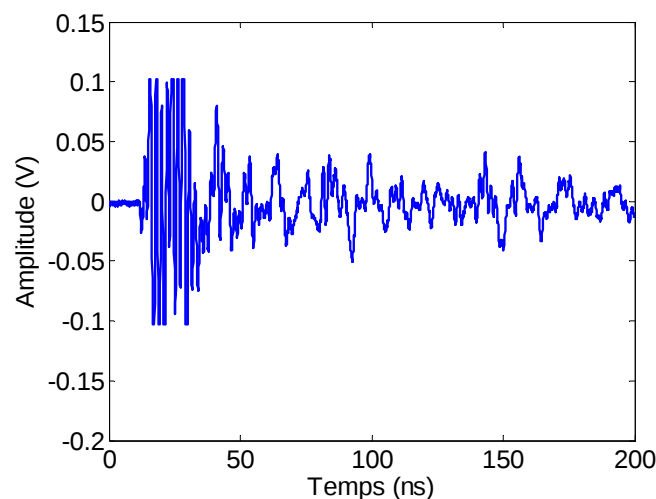


Fig. 3. 11. Événement EM transitoire écrêté à 0.1 V

Pour éviter ce problème d'écroulement, on a réalisé sur un trajet de 25 minutes, des mesures avec un oscilloscope configuré avec une échelle d'amplitude étendue, permettant d'enregistrer correctement des amplitudes crêtes maximales pouvant atteindre 0.52 V.

Sur la durée de ce trajet, on a enregistré 5473 fichiers temporels.

Sur la totalité de ces fichiers, l'algorithme indique que 4910 fichiers temporels enregistrés correspondent à des événements EM transitoires.

La Fig. 3. 12. donne l'amplitude crête des 4910 événements EM transitoires.

L'axe des abscisses de ce graphe donne l'ordre des événements transitoires et l'axe des ordonnées donne l'amplitude crête des événements transitoires. Chaque point présenté sur cette figure donne la correspondance entre l'ordre des événements transitoires et son amplitude crête.

La Fig. 3. 12. montre que les amplitudes crêtes des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement sont comprises entre 26 mV et 0.52 V.

Quelques événements EM transitoires ont une amplitude crête supérieure à 0.5 V mais leur densité reste très faible dans la population d'événements EM transitoires enregistrés puisque, seuls 10 événements EM transitoires sur les 4910 détectés ont une amplitude crête supérieure à 0.5 V.

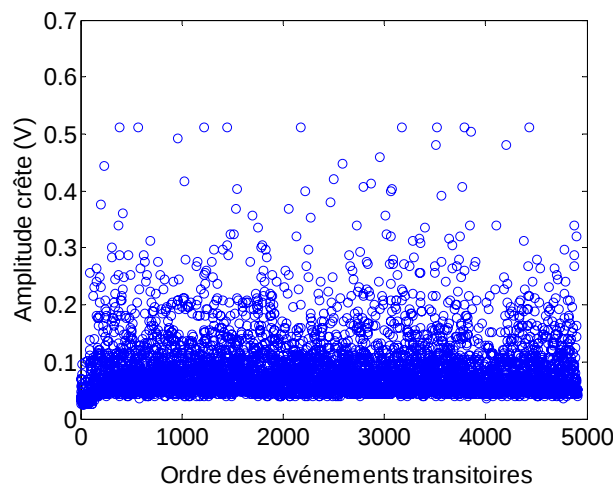


Fig. 3. 12. Amplitude crête des événements EM transitoires observés entre Saumur et Saint Pierre des Corps

On supposera donc que l'amplitude crête des événements EM transitoires captés par les antennes GSM-R fixées à bord d'un train en mouvement est comprise entre 26 mV et 0.5 V.

Par contre, il faudra noter que l'amplitude crête des événements EM transitoire peut varier en fonction de la distance qui sépare le pantographe de l'antenne GSM-R. Cette distance peut avoir une influence non négligeable sur les mesures et doit être prise en compte lors des tests

d'immunité du système GSM-R. On verra dans la suite de ce travail l'influence de la distance entre l'antenne et le pantographe sur les amplitudes crêtes des événements EM transitoires.

A ce stade, on peut conclure que l'analyse des caractéristiques temporelles (TM, TD) et d'amplitude crête (A) des événements EM transitoires montre que l'étalement de ces paramètres est comme présenté sur le Tab. 3. 3. mais ne donne aucune information sur leur densité de distribution dans leur plage d'étalement.

	MINIMUM	MAXIMUM
Temps de montée (ns)	0.2	1
Durée temporelle (ns)	0.4	20
Amplitude crête (mV)	26	500

Tab. 3.3. Tableau récapitulatif des caractéristiques temporelles et d'amplitude crête des événements EM transitoires enregistrés

On note simplement ici, que les résultats et les valeurs présentés dans cette partie ne sont que des tendances et doivent être vérifiés à travers une étude statistique présentée dans la suite de ce chapitre.

III. ETUDE DES INTERVALLES DE TEMPS (IT) QUI SEPARANT LES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES SUCCESSIVES OBSERVEES A BORD D'UN TRAIN EN MOUVEMENT

Vu le nombre important de fenêtres temporelles collectées à bord du train à l'aide du BM 2, il est très difficile de déterminer manuellement le nombre d'événements transitoires enregistrés et l'intervalle de temps qui les sépare sur chaque fenêtre enregistrée. On a donc développé un algorithme permettant de traiter automatiquement ces fenêtres temporelles et de ressortir les données intéressantes.

Après une introduction sur l'importance du nombre des événements transitoires à bord d'un train en mouvement, on présente l'algorithme de comptage développé. La dernière partie présente les résultats obtenus.

1. Importance du nombre d'occurrences des événements transitoires à bord du train

Comme cela a été introduit précédemment, on cherchera dans cette partie à déterminer l'intervalle de temps qui sépare l'apparition de deux événements EM transitoires successifs à bord d'un train en mouvement en vue d'étudier l'immunité du système GSM-R face à ce type de perturbations EM.

L'apparition des événements EM transitoires peut être très fréquente à bord d'un train en mouvement. En effet, l'intervalle de temps qui sépare deux événements EM transitoires successifs peut être très court.

Sur la Fig. 3. 13. on présente la forme d'onde enregistrée sur un fichier temporel collecté lors des mesures. Sur cette Figure, on observe deux événements EM transitoires successifs qui apparaissent avec un intervalle de temps $IT = 72 \text{ ns}$.

Déterminer les intervalles de temps qui séparent des événements EM transitoires successifs avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes n'a aucun intérêt pour l'étude de l'immunité du système GSM-R face à ce type de perturbations EM.

En effet, on sait que la durée d'émission d'un seul bit GSM-R est normalisée à $3.7 \mu\text{s}$.

Sous l'hypothèse qu'un seul événement EM transitoire apparaissant durant la durée de transmission d'un bit suffit pour qu'un bit GSM-R soit perturbé, nous avons limité la résolution temporelle des IT à $3.7 \mu\text{s}$.

Pour estimer l'immunité du système GSM-R il est donc inutile de déterminer le IT avec une résolution plus importante que $3.7 \mu\text{s}$.

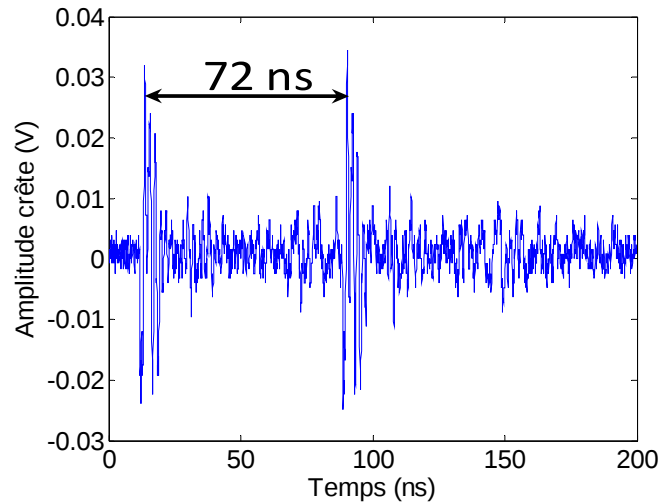


Fig. 3. 13. Fichier temporel comportant deux événements EM transitoires successifs avec un intervalle de temps de 72 ns

On verra dans le quatrième chapitre que ce paramètre a un impact très important sur l'étude de l'immunité du système GSM-R confronté aux rafales de perturbations EM transitoires.

En effet, si la récurrence des perturbations transitoires est importante sur la durée de transmission d'un burst GSM-R (577 μ s), plusieurs bits émis peuvent être affectés et l'intégrité de l'information transmise par le système peut être mise à rude épreuve. Pour cela, nous allons, dans la suite, étudier ce paramètre avec beaucoup d'attention.

Les résultats présentés ici sont issus des fichiers de mesures obtenus à l'aide du BM 2.

Durant 25 minutes, soit 1500 secondes de temps de mesure, l'oscilloscope a mesuré 1568 fichiers temporels de 400 μ s.

Par ailleurs, des tests préliminaires réalisés en laboratoire à l'aide de cet oscilloscope, ont montré que le temps d'enregistrement d'un seul fichier de 400 μ s sur le disque dur de l'oscilloscope numérique est légèrement inférieur à 1 seconde, soit, à peu près 1500 fichiers temporels sur une durée de mesure de 1500 secondes.

Ainsi, on conclura qu'à bord du train, l'oscilloscope a enregistré en continu les fenêtres temporelles. Ce qui prouve la présence permanente des événements EM transitoires durant toute la durée de la mesure. Ceci, confirme l'importance du nombre des événements EM transitoires qu'on peut observer à bord d'un train en mouvement.

Il faut noter que ces fichiers temporels de 400 μ s sont très volumineux (en terme d'espace mémoire occupé) et ont posé quelques problèmes lors de leur enregistrement et leur traitement. Pour le moment, on n'arrive pas à réduire la taille de ces fichiers, mais on a adapté les algorithmes développés pour l'étude des IT à ce type de fichiers.

En effet, les programmes réalisés ont permis d'optimiser le temps de lecture et de traitement de ces fichiers, ce qui a facilité et accéléré la phase de traitement et d'exploitation des résultats de mesure.

La Fig. 3. 14. donne un exemple de bruit EM mesuré sur l'antenne GSM-R embarquée à bord d'un train en mouvement sur une fenêtre temporelle de 400 μs .

Deux événements EM transitoires ont été enregistrés sur cette fenêtre avec des amplitudes crêtes largement supérieures à l'amplitude du bruit EM permanent observé.

Les intervalles de temps IT qui seront caractérisés sur ces fenêtres temporelles se limiteront aux intervalles de temps qui séparent deux événements EM transitoires successifs qui apparaissent avec des amplitudes crêtes supérieures au niveau de bruit EM permanent.

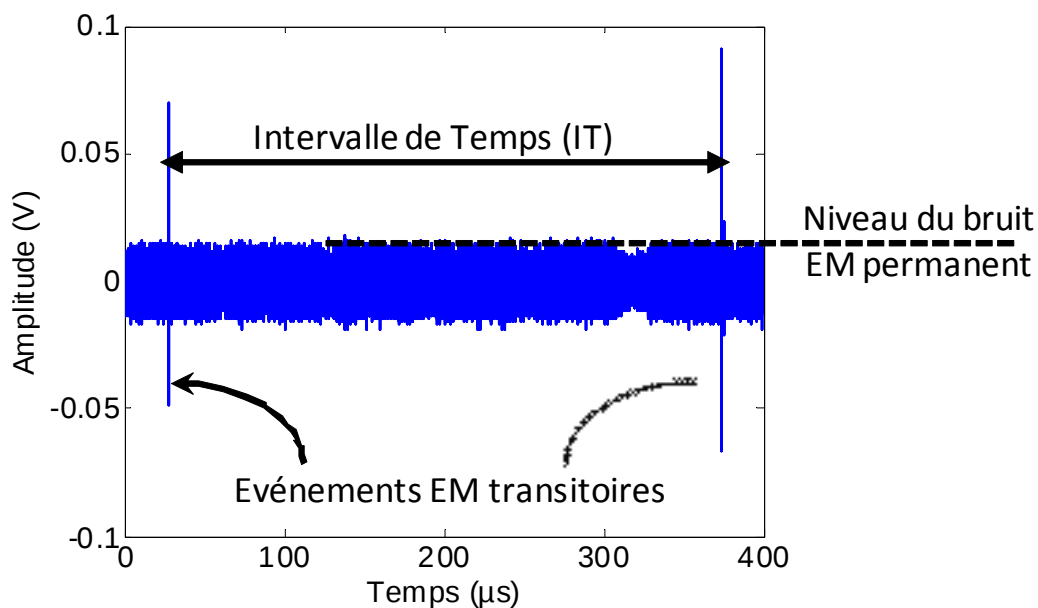


Fig. 3. 14. Fenêtre temporelle enregistrée sur 400 μs

2. Algorithme de comptage des signaux transitoires

Pour étudier l'étalement temporel des intervalles de temps qui séparent deux événements électromagnétiques transitoires successifs sur le trajet d'un train, un algorithme a été développé permettant dans un premier temps de détecter l'occurrence des événements EM transitoires enregistrés sur chaque fenêtre temporelle de 400 μs . L'algorithme procède par la suite au calcul du temps qui sépare l'apparition des événements EM transitoires.

Comme cela a été dit précédemment, on essaiera de déterminer le paramètre IT avec une résolution de 3.7 μs .

La détection de chaque événement transitoire sur une longue fenêtre temporelle est généralement dépendante du rapport entre l'amplitude crête de ce dernier et niveau de bruit EM permanent enregistré sur la fenêtre. Chaque événement est détecté lorsque son amplitude

crête est au minimum, une fois et demi supérieure à l'amplitude maximale du bruit EM permanent. Ce critère a été obtenu après plusieurs essais sur ces fenêtres temporelles.

Pour chaque fenêtre enregistrée, l'algorithme commence donc par estimer le niveau de bruit EM permanent observé sur la fenêtre temporelle.

On note que quelques fenêtres récupérées par l'oscilloscope ont été enregistrées avec un niveau de bruit EM permanent de moyenne différente de 0 V, telle que le montre la Fig. 3. 15. Sur cette figure, on remarque que les événements EM transitoires enregistrés sur cette fenêtre ont été combinés avec un bruit EM permanent dont l'amplitude moyenne est négative.

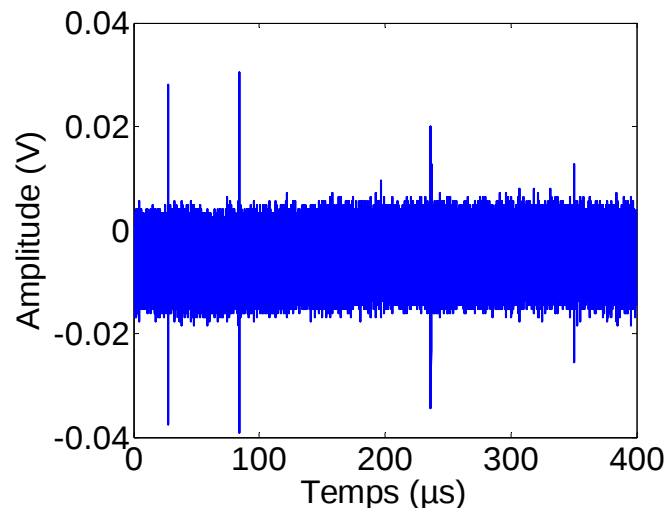


Fig. 3. 15. Fenêtre temporelle enregistrée avec un niveau moyen de bruit EM permanent négatif

Ce décalage en amplitude introduit généralement un problème lors de la détection, par des procédés informatiques, des événements EM transitoires enregistrés sur les fenêtres temporelles. L'expérience montre que l'algorithme peut introduire de fausses détections et donc des erreurs importantes sur l'étude des intervalles de temps.

Pour éviter ce type de problème, l'algorithme procède à une rectification de la composante continue de chaque fenêtre temporelle afin de faciliter le traitement de ces fichiers.

Les différentes étapes de l'algorithme développé sont décrites ci-dessous :

- Rectifier la composante continue de la fenêtre traitée
- Déterminer le niveau du bruit EM permanent enregistré sur la fenêtre
- Comparer l'amplitude maximale du bruit EM enregistré sur la fenêtre de 400 μs et le niveau de bruit EM permanent obtenu dans la deuxième étape de l'algorithme.
- Dans le cas où l'amplitude maximale obtenue est une fois et demi supérieure au niveau de bruit EM permanent, on enregistre dans un tableau l'ordre de l'événement EM transitoire localisé. Puis, on annule tous les points qui se trouvent sur une fenêtre temporelle de 3.7 μs autour de la position de localisation de l'événement EM transitoire détecté. Cette fenêtre

temporelle commence à 0.7 μs avant l'apparition de l'événement EM transitoire et s'arrête 3 μs après l'événement transitoire (ces valeurs ont été déterminées après plusieurs essais sur les fenêtres temporelles enregistrées). Cette fenêtre est appelée « la fenêtre Zéros ».

- Cet algorithme s'arrête lorsqu'il ne trouve aucun nouvel événement transitoire sur la fenêtre étudiée.

- Le calcul de IT se fait à la fin de cet algorithme après une réorganisation par ordre croissant des différentes positions des événements EM transitoires localisés.

En appliquant cet algorithme à la fenêtre temporelle présentée sur la Fig. 3. 16., l'algorithme n'effectue aucune fausse détection d'événement EM transitoires, tel que le montre cette figure où les points rouges pointent les événements EM transitoires détectés par l'algorithme.

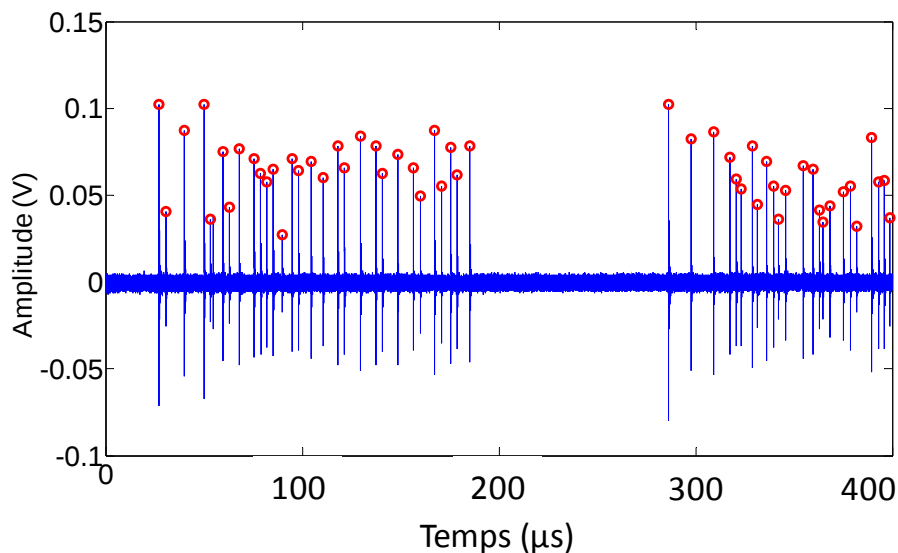


Fig. 3. 16. Fenêtre temporelle traitée selon l'algorithme amélioré

3. Exploitation des résultats

Le traitement des 1568 fichiers temporels enregistrés durant les 25 minutes d'essais à bord du train avec l'algorithme présenté précédemment, montre que 1030 fichiers temporels enregistrés ne comportent qu'un seul événement EM transitoire sur les 400 μs d'enregistrement. Ces fichiers ne seront malheureusement pas exploitables pour l'étude des intervalles de temps entre les événements EM transitoires successifs observés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R.

Sur les 538 fichiers temporels restants, 40 fichiers enregistrés ne comportent aucun événement EM transitoire ; sur ces fichiers temporels, les événements EM transitoires enregistrés ont été

noyés dans un bruit EM permanent trop élevé. Ce type de fichier est généralement collecté lors du passage du train à proximité des stations de base du système GSM public où le niveau de bruit EM permanent dépasse le niveau de Trig de l'oscilloscope.

Donc sur les 1568 fichiers temporels de 400 μs enregistrés, seuls 498 fichiers temporels comportent deux événements EM transitoires ou plus et sont ainsi exploitables pour l'étude des intervalles de temps qui séparent les événements EM transitoires successifs.

Une analyse fine de ces fichiers par l'algorithme de comptage décrit au-dessus, montre que sur les 498 fenêtres temporelles restantes on comptabilise 1121 intervalles temporels séparant des événements EM transitoires successifs.

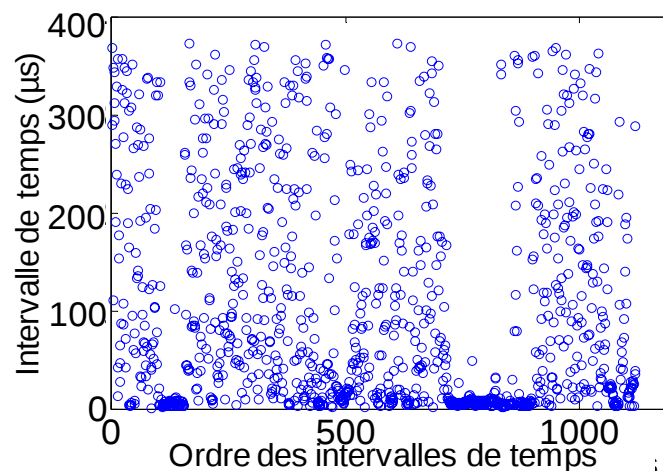


Fig. 3. 17. Intervalles de temps entre deux événements EM transitoires successifs observés par l'antenne GSM-R fixée au-dessus du train

La Fig. 3. 17. donne l'étalement temporel des 1121 intervalles de temps qui séparent les événements EM transitoires successifs observés sur des fenêtres temporelles de 400 μs .

L'axe des abscisses de ce graphe donne l'ordre des intervalles de temps et l'axe des ordonnées donne la valeur de l'intervalle de temps. Chaque point présenté sur cette figure donne la correspondance entre l'ordre de chaque intervalle de temps calculé et la durée temporelle correspondante.

Les intervalles de temps sont compris entre 0.7 μs et 360 μs .

Malheureusement, on remarque que l'algorithme détecte des événements EM transitoires qui apparaissent successivement avec des intervalles inférieurs à 3.7 μs . Ces valeurs sont principalement dues à la position (0.7 μs avant et 3 μs après l'apparition du transitoire détecté) de la « fenêtre Zeros » par rapport à celle de chaque événement transitoire collecté. Ainsi, l'algorithme peut détecter tous les événements transitoires qui apparaissent avec un IT compris entre 0.7 μs et 3 μs . Ces valeurs ont donc été déterminées après plusieurs essais sur les fenêtres temporelles enregistrées afin d'obtenir un nombre minimum de IT inférieurs à 3.7 μs .

Avec ces valeurs, on a remarqué que seuls 16 IT ont une durée inférieure à $3.7 \mu\text{s}$ sur les 1121 obtenus.

On verra par la suite, que ces valeurs n'auront presque aucune influence sur l'étude d'immunité du système GSM-R. De ce fait, on n'a pas cherché à les filtrer dans des travaux présentés dans la suite.

Par ailleurs, sur la Fig. 3. 17. on remarque que les intervalles de temps sont dispersés d'une manière très aléatoire sur toute la plage temporelle qu'ils couvrent.

Cependant, on observe que les intervalles de temps dont l'ordre est compris entre 100 – 160 et 720 – 900 se concentrent entre $0.7 \mu\text{s}$ et $15 \mu\text{s}$. Ces intervalles de temps ont été principalement collectés sur des fenêtres temporelles où on a pu observer plus de 50 événements transitoires sur les $400 \mu\text{s}$ de temps d'enregistrement, dont un exemple est présenté sur la Fig. 3.16. Ce type de fenêtre temporelle est généralement observé sur des zones limitées du parcours. On pense que leur apparition peut être liée à la courbure de la trajectoire (virages aigus par exemple).

On pourrait conclure à la fin de cette partie que les intervalles de temps qui séparent les événements EM transitoires successifs observés à bord d'un train en mouvement avec une antenne GSM-R sont compris entre $0.7 \mu\text{s}$ et $360 \mu\text{s}$.

On notera ici que la variation des intervalles de temps qui séparent des événements EM transitoires successifs à bord d'un train en mouvement dépend sensiblement de la vitesse du train. En effet, plus la vitesse du train est élevée plus les intervalles de temps deviennent courts, donc la fréquence d'apparition des événements EM transitoires augmente. Ceci peut avoir une influence importante sur l'immunité du système GSM-R, puisqu'une forte répétition des bruits transitoires peut facilement altérer la bonne transmission des bits du système GSM-R. On verra dans le quatrième chapitre, l'importance de l'impact du paramètre IT sur l'immunité du système GSM-R.

Remarques :

Les résultats présentés sur cette partie montrent que les caractéristiques temporelles et d'amplitude crête des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du train sont très variables sur des plages temporelles et d'amplitude assez large. Toutes les caractéristiques de temps et d'amplitude des événements EM transitoires présentées ici ont un caractère aléatoire sur les plages qu'ils couvrent.

Pour faire des tests d'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires observées dans le milieu ferroviaire, on peut penser exposer le système GSM-R à des signaux composés d'événements EM transitoires ayant les caractéristiques temporelles typiques (c'est-à-dire qu'ils ont des caractéristiques temporelles les plus fréquentes) observées en pratique à bord du train. Malheureusement, ceci ne peut en aucun cas permettre de faire des tests d'immunité sous des conditions représentatives de ce qu'on peut observer à bord d'un train en mouvement.

En effet, il faut garder à l'esprit que le système GSM-R est un système numérique qui utilise des protocoles lui permettant de résister à certains types de perturbations électromagnétiques. Limiter les signaux de test d'immunité à des événements transitoires ayant les caractéristiques temporelles typiques peut ne pas permettre d'évaluer les risques réels que peut subir le système GSM-R dans son environnement. Il est donc important que l'étude de l'immunité du système GSM-R se fasse en l'exposant à des signaux test comportant des événements transitoires dont les caractéristiques couvrent les mêmes plages temporelles et d'amplitude observées à bord du train.

La densité d'apparition de ces événements sur un signal de test a aussi son importance. En effet, si un signal test comporte des événements transitoires avec des caractéristiques étalées sur les mêmes plages (temporelles et d'amplitude) observées en réalité, mais une majorité d'événements transitoires sévères (caractéristiques temporelles et d'amplitude qui génèrent des niveaux élevés de bruit sur la bande GSM-R) pour l'intégrité des bits GSM-R, alors le test d'immunité ne sera pas représentatif de la réalité des conditions d'opération du système GSM-R. Il faudrait donc se pencher sur l'étude de la densité d'apparition des caractéristiques temporelles et d'amplitude des événements transitoires.

Par ailleurs, le caractère aléatoire des caractéristiques des événements EM transitoires observés ne nous permet malheureusement pas de les modéliser par des méthodes analytiques déterministes. On a donc choisi d'exploiter les méthodes statistiques pour pouvoir caractériser et étudier les caractéristiques des événements EM transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement.

De plus, il est très difficile de pouvoir ressortir d'une manière analytique les caractéristiques temporelles et d'amplitudes des événements EM transitoires qui apparaissent lors de mauvais contact entre caténaire et pantographe. En effet, il y a un manque important d'information sur les mécanismes physiques qui contrôlent la génération de ces événements EM transitoires et de plus, on ne connaît pas les éléments importants de l'infrastructure ferroviaire qui peuvent avoir un impact sur les caractéristiques temporelles des événements EM transitoires.

D'un autre côté, il est très difficile d'exploiter les logiciels de simulations numériques pour la modélisation du contact glissant entre la caténaire et le pantographe et pouvoir ainsi étudier les caractéristiques des événements transitoires qui apparaissent au niveau de ce contact.

Donc la caractérisation des différents paramètres des événements EM transitoires sera basée sur une étude statistique qui sera détaillée dans la partie suivante.

A partir de cette étude, on essayera par la suite de générer des signaux de test composés d'événements EM transitoires ayant des caractéristiques temporelles et d'amplitude crête statistiquement comparables à celles obtenues par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement.

IV- ETUDE STATISTIQUE DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES ET D'AMPLITUDE DES BRUITS EM TRANSITOIRES RENCONTRES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

Dans le but de réaliser des tests d'immunité du système GSM-R face à des signaux de bruit EM transitoires représentatifs des conditions EM qu'il peut rencontrer à bord d'un train en mouvement, il faut que ces signaux de test soient composés d'événements transitoires dont les paramètres temporels et d'amplitude soient comparables aux signaux observés sur site réel.

L'étude statistique présentée dans cette partie permettra de présenter le grand nombre de données collectées d'une manière simplifiée. Ainsi, il sera possible de vérifier la stabilité de ces paramètres face à différentes conditions d'opération et définir par la suite les caractéristiques des signaux de test à appliquer au système GSM-R lors des tests de son d'immunité face aux événements transitoires.

Ainsi, les signaux qu'on pense utiliser lors des tests d'immunité du système GSM-R seront semblables à ceux observés à bord d'un train en mouvement en terme statistique, c'est-à-dire que les paramètres temporels et d'amplitude de ces signaux de test auront des distributions statistiques semblables à celles observées à bord d'un train en mouvement.

Le choix s'est porté sur la caractérisation des paramètres de ces événements EM transitoires en étudiant leur fonction densité de probabilité puisque ces fonctions permettent facilement d'évaluer les valeurs typiques de chaque caractéristique temporelle et d'amplitude et peuvent aussi permettre de déterminer la nature de leur distribution et les approcher par des lois statistiques connues [III-3]. Ceci qui peut faciliter par la suite leur classification et la génération de signaux de tests.

Une étude statistique des caractéristiques temporelles ou d'amplitude des événements EM transitoires nécessite principalement une base de données élaborée à partir de mesures réalisées sous des conditions de fonctionnement normales d'un train.

Les résultats présentés dans la suite de ce paragraphe sont issus des deux campagnes de mesures (A et B).

1. Etude statistique des temps de montée des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement

L'étude précédente de l'étalement temporel des temps de montée des événements EM transitoires collectés lors de la campagne B a montré que presque 24000 événements transitoires sur un total de 25700 fichiers temporels enregistrés avaient un temps de montée compris entre 0.2 ns et 1 ns.

Pour identifier les valeurs typiques de temps de montée des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R la Fig. 3. 18. montre l'histogramme des temps de montée des événements EM transitoires sur la totalité de leur gamme temporelle.

L'axe des abscisses de la Fig. 3. 18. donne l'étalement temporel des temps de montée des événements EM transitoires et l'axe d'ordonnées donne un nombre d'occurrences.

Chaque barre de la Fig. 3. 18. donne une correspondance entre l'intervalle des temps de montée qu'elle couvre et le nombre d'occurrences des événements EM transitoires qui apparaissent avec un temps de montée compris dans cet intervalle.

Sur la Fig. 3. 18., on remarque que la majorité des événements EM transitoires ont un temps de montée compris entre 0.3 ns et 0.5 ns et une valeur moyenne de 0.4 ns. Le nombre d'occurrences des événements EM transitoires qui apparaissent avec des temps de montée situés de part et d'autre de cet intervalle de temps baisse sensiblement.

Par ailleurs, il faut que les signaux test soient non seulement composés d'événements EM transitoires avec des temps de montées typiques compris entre 0.3 ns et 0.5 ns, mais ils doivent aussi contenir des événements EM transitoires qui apparaissent avec des temps de montée étalés sur toute la plage temporelle 0.2 ns et 1 ns. Surtout que les événements transitoires qui apparaissent avec les temps de montée les plus faibles (soit dans ce cas les valeurs les plus proches de 0.2 ns) risquent d'être les plus pénalisants pour le système GSM-R.

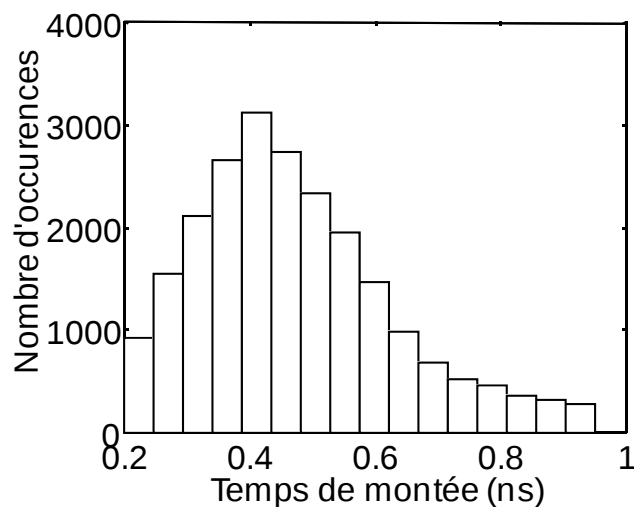


Fig. 3. 18. Histogramme des Temps de Montée de 24000 événements EM transitoires collectés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du train

Le temps de montée d'un événement transitoire joue principalement sur la bande de fréquence couverte par cet événement, et plus le temps de montée est court, plus le spectre couvert est étendu. Malheureusement, à ce stade on ne peut pas lier la couverture spectrale des événements transitoires avec la valeur calculée de leur temps de montée. En effet, l'approche employée pour le calcul des temps de montée des événements transitoires collectés au sein de l'environnement ferroviaire est très grossière et critiquable et cette approche a été simplement employée au début en raison de notre manque important de connaissance sur les événements transitoires qu'on collectait à bord du train.

En réalité, chaque événement transitoire est composé par plusieurs pics (comme le montre par exemple la Fig. 3. 7.) qui apparaissent avec des fronts de montée très rapides qu'on ne considère pas nécessairement lorsqu'on estime le temps de montée de 10 % à 90 % de l'amplitude maximale. De ce fait, se limiter à ce temps de montée, ne permet pas d'avoir une idée exacte de l'ensemble des temps de montée observés sur chaque événement transitoire collecté. Pour réduire l'impact de ce manque de connaissance sur l'étalement réel des temps de montée, lors des tests d'immunité, il faudrait faire varier ce paramètre sur toute la plage temporelle qu'on a observé à bord du train et cette fois en introduisant la fonction densité de probabilité (FDP).

L'idée qu'on se propose de développer dans cette partie consiste à étudier la FDP expérimentale des temps de montée. On modélisera cette fonction en déterminant une loi de distribution statistique connue et les paramètres correspondant à cette loi qui permettent d'approximer au mieux la distribution des temps de montée expérimentaux.

Finalement, une fois la loi de distribution déterminée, il est généralement facile de générer un tableau de valeurs comportant des temps de montée distribués d'une manière semblable à ce qui a été observé en pratique à bord d'un train. Cette partie sera décrite plus en détail dans le quatrième chapitre de ce manuscrit.

La fonction densité de probabilité d'une variable aléatoire X notée généralement $f(x)$ est une fonction qui permet de représenter une loi de probabilité sous une forme d'intégrale. L'équation 3. 1 donne la probabilité que X soit comprise entre deux valeurs a et b , avec $a < b$.

$$\Pr(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx \quad 3.1$$

Donc la probabilité que X soit comprise entre x et $x+dx$ est égale à $f(x) dx$, avec dx une variation infinitésimale de x .

On peut ainsi écrire que $f(x)$ peut s'écrire alors comme le rapport entre $\Pr(x < X < x+dx)$ et dx .

Ainsi, la densité de probabilité du temps de montée, supposé être une variable aléatoire, peut être déterminée par le rapport entre la probabilité d'apparition des temps de montée et une variation faible du temps de montée.

Donc à partir de l'histogramme des temps de montée présenté sur la Fig. 3. 18. on peut remonter à la densité de probabilité expérimentale des temps de montée lorsque les différentes classes des valeurs qui composent l'histogramme sont suffisamment étroites par rapport à l'étalement temporel des temps de montée. Dans le cas étudié, les classes sont présentées par les barres.

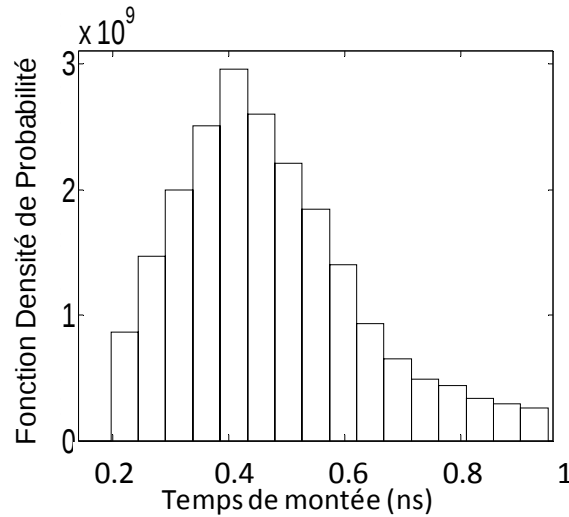


Fig. 3. 19. Densité de probabilité expérimentale des Temps de montée des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée à bord d'un train en mouvement

Puisque la largeur des classes qui composent l'histogramme des temps de montée est très petite par rapport à l'étalement temporel des temps de montée observés à bord du train, il est possible de remonter à la densité de probabilité des temps de montée expérimentaux des événements EM transitoires.

Sur la Fig. 3. 19. L'axe des abscisses donne les temps de montée compris entre 0.2 ns et 1 ns et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité associée.

Chaque barre de la Fig. 3. 19. fait correspondre la densité de probabilité des temps de montée qu'elle couvre.

Dans la suite de cette partie, on se propose de modéliser la distribution des temps de montée obtenue d'une manière expérimentale par une loi statistique connue.

Des tests réalisés à l'aide du logiciel MATLAB nous ont permis de modéliser la fonction densité de probabilité expérimentale des temps de montée par la densité de probabilité d'une loi lognormale dont l'expression est donnée par l'équation 3. 2.

TM est le temps de montée, μ la moyenne et σ l'écart type du logarithme de la variable TM.

$$f\left(\frac{TM}{\mu, \sigma}\right) = \frac{1}{TM \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(TM) - \mu)^2}{2 \sigma^2}\right) \quad 3. 2.$$

Avec $\mu = -21.55$ et $\sigma = 0.36$, μ et σ sont appelés les paramètres de la distribution et ont été déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance avec 95 % d'intervalle de confiance.

Les temps de montée des événements EM transitoires observés par l'antenne GSM-R sont donc distribués selon une loi lognormale.

Ce qui signifie que le logarithme du temps de montée des événements EM transitoires est distribué selon une loi normale.

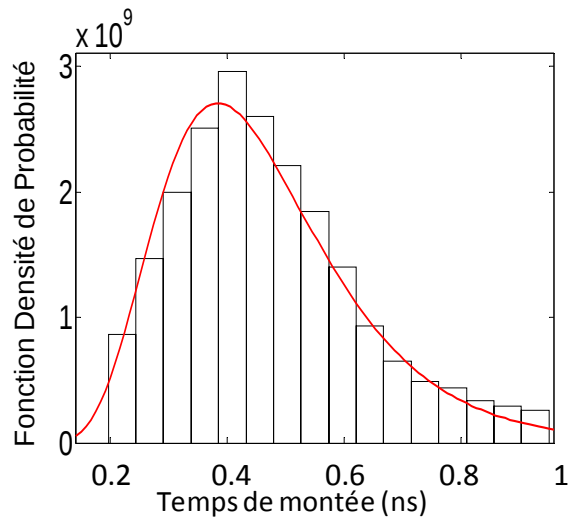


Fig.3. 20. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Temps de montée des événements EM transitoires

La Fig.3. 20. donne une superposition entre la densité de probabilité expérimentale des temps de montée et la densité de probabilité empirique donnée par l'équation 3.2.

L'axe des abscisses donne les temps de montée et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Le graphe à barre donne la FDP expérimentale des temps de montée et la courbe rouge donne la FDP empirique déterminée à partir de l'équation 3.2.

La Fig. 3. 20., montre une correspondance satisfaisante entre la FDP expérimentale des TM des événements transitoires et la FDP de la loi lognormale.

Des tests complémentaires réalisés à l'aide de la méthode de Kolmogorov-Smirnov [III-4, III-5] utilisée principalement pour étudier la validité d'une loi statistique théorique choisie pour la modélisation d'une variable aléatoire obtenue expérimentalement, montre que la loi lognormale est la loi qui permet de modéliser le plus fidèlement possible la distribution des temps de montée des événements EM transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement.

- Etude de la stabilité des lois de distribution des temps de montée

Lors de la campagne de mesure A présentée dans le chapitre 2, on a mesuré des événements EM transitoires à l'aide d'une antenne GSM-R similaire à celle utilisée lors de la campagne de mesure B. La même étude statique présentée plus haut a été réalisée sur les résultats de mesure obtenus lors de la campagne de mesure A.

Cette étude montre que les temps de montée des événements EM transitoires collectés lors de la campagne de mesure A suivent exactement les mêmes lois statistiques retrouvées lors de la campagne de mesure B. De plus, les paramètres de la loi Lognormale retrouvés sont restés presque constants pour deux campagnes de mesure.

En effet, sur la campagne A, les temps de montée sont distribués selon une loi lognormale (avec $\mu = -21.5$ et $\sigma = 0.37$).

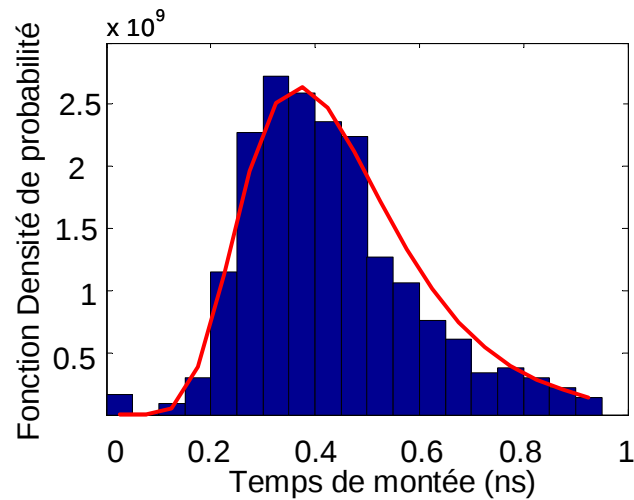


Fig. 3. 21. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Temps de montée des événements EM transitoires mesurés lors de la campagne de mesure A

La Fig. 3.21. donne la FDP des temps de montée des événements EM transitoires observés à bord du train lors de la campagne A.

Le graphe à barres donne la FDP expérimentale de TM et la courbe rouge donne la FDP de la loi lognormale précédemment citée.

2. Caractérisation statistique des durées des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement

L'étude précédente de l'étalement temporel des durées temporelles (DT) des événements EM transitoires a montré que presque 20000 événements transitoires sur un total de 25700 fichiers temporels enregistrés avaient une durée temporelle comprise entre 0.4 ns et 20 ns.

Pour identifier les valeurs typiques des durées temporelles des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R, la Fig. 3. 22. montre l'histogramme des durées des événements EM transitoires sur la totalité de leur gamme temporelle.

L'axe des abscisses de la Fig. 3. 22. donne l'étalement temporel des DT des événements EM transitoires et l'axe d'ordonnées donne un nombre d'occurrences.

Chaque barre de la Fig. 3. 22. donne une correspondance entre l'intervalle des durées temporelle qu'elle couvre et le nombre d'occurrence des événements EM transitoires qui apparaissent avec une durée temporelle comprise dans cet intervalle.

Majoritairement, les durées temporelles des événements transitoires collectés à bord d'un train en mouvement se situent entre 0.4 ns et 6 ns et lorsqu'on prend en compte l'ensemble des événements transitoires, la durée moyenne est de l'ordre de 5.9 ns.

La Fig. 3. 22., montre que le nombre d'occurrences des événements EM transitoires qui apparaissent avec des durées temporelles supérieures à cet intervalle baisse sensiblement.

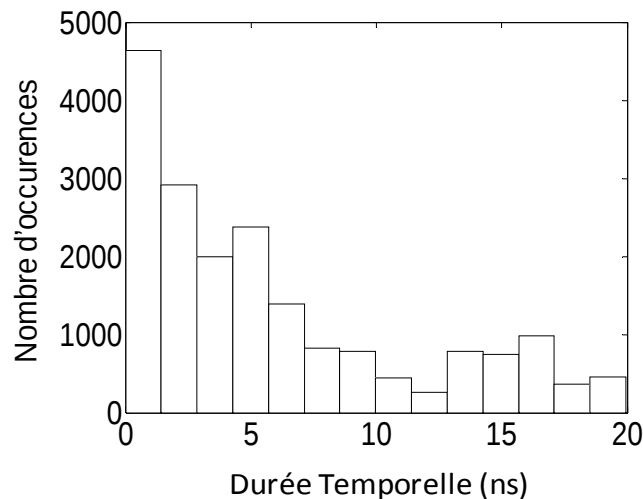


Fig. 3. 22. Histogramme des Durées Temporelles de 20000 événements EM transitoires collectés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du train

Par ailleurs, pour générer des signaux de test appropriés pour les tests d'immunité du système GSM-R, il faut que ces signaux soient non seulement composés d'événements EM transitoires avec des durées temporelles typiques comprises entre 0.4 ns et 6 ns, mais ils doivent aussi contenir des événements EM transitoires qui apparaissent avec des durées temporelles étalées sur toute la plage temporelle 0.4 ns et 20 ns, surtout que les événements transitoires qui apparaissent avec les durées les plus longues risquent d'être les moins pénalisants pour le système GSM-R. Ainsi, le test d'immunité peut être représentatif de ce que peut rencontrer le système GSM-R à bord d'un train.

Dans la suite plus de détails seront donnés pour mieux comprendre l'intérêt de faire varier les durées temporelles des événements transitoires sur toute la plage observée à bord du train.

Comme cela a été dit précédemment pour le calcul des temps de montée, l'approche utilisée pour calculer les durées est critiquable.

En effet, chaque événement transitoire peut être composé d'une succession d'événements transitoires de très courte durée (événements transitoires composés d'une succession de rebonds ou les événements transitoires entretenus présentés précédemment dans ce chapitre).

La durée temporelle calculée (définie par la durée correspondant à une amplitude supérieure à 50 % de l'amplitude crête du transitoire) ne correspond nécessairement pas à la durée temporelle la plus courte observée sur l'événement étudié. Cette approche a donc tendance à surestimer la durée temporelle des événements transitoires et ne permet pas de connaître les durées réelles des événements transitoires.

Pour réduire l'impact de ce manque de connaissance sur les durées temporelles réelles des événements transitoires, il faudrait faire varier les durées temporelles des événements transitoires qui composent les signaux test sur toute la plage observée à bord du train pour réaliser des tests d'immunité qui se rapprochent des conditions réelles d'opération d'un train.

En résumé, lors des tests d'immunité, on ne peut pas se limiter à l'utilisation de signaux tests composés d'événements transitoires avec des durées temporelles limitées aux valeurs les plus fréquentes. Il faudrait plutôt faire varier ce paramètre sur toute la plage temporelle obtenue à bord du train et cette fois, en introduisant la fonction densité de probabilité (FDP).

De plus ce choix peut être justifié par le fait que le système GSM-R a le pouvoir de corriger quelques bits erronés si leur taux ne dépasse pas une limite définie par son protocole. Exposer le système GSM-R à des rafales d'événements transitoires très pénalisants peut le mettre en défaut et peut causer sa défaillance. Les résultats d'immunité obtenus ne sont pas représentatifs de ce qu'on peut observer dans la réalité à bord d'un train. En effet, à bord du train, les événements transitoires les plus pénalisants (avec des durées courtes) peuvent être suivis par des événements EM transitoires moins pénalisants pour le système GSM-R, et par conséquent, le système GSM-R par son pouvoir correcteur peut corriger les trames qu'il reçoit.

Donc limiter nos signaux de test à des événements EM transitoires de durées très courtes ne permet pas d'aboutir à des tests représentatifs de la réalité des conditions expérimentales.

D'où l'importance de générer des signaux tests comportant des événements EM transitoires qui apparaissent avec des durées temporelles étalées sur toute la gamme temporelle des DT. Ceci en gardant à l'esprit qu'il faut générer des signaux tests composés d'événements transitoires dont les temps de montée respectent des densités semblables à celles observées à bord du train.

L'idée qu'on se propose de développer dans cette partie consiste à étudier la fonction densité de probabilité expérimentale des durées temporelles. A partir de cette fonction expérimentale on essaiera de trouver une fonction densité de probabilité qu'on appellera empirique d'une loi de distribution statistique théorique connue avec les paramètres correspondants qui permettent d'approximer au mieux la distribution des durées temporelles.

La densité de probabilité des durées temporelles, supposées être des variables aléatoires, peut être déterminée par le rapport entre la probabilité d'apparition des durées temporelles et une variation faible de ces durées.

Comme pour le temps de montée, à partir de l'histogramme des durées présenté sur la Fig. 3. 22., on peut remonter à la densité de probabilité expérimentale des durées temporelles lorsque les différentes classes des valeurs qui composent l'histogramme sont suffisamment étroites par rapport à l'étalement temporel des durées temporelles. Dans la fig. 3. 22., les classes sont présentées par les barres.

Puisque la largeur des classes qui composent l'histogramme de DT est très petite par rapport à l'étalement temporel des durées temporelles observées à bord du train, il est possible de remonter à partir de cet histogramme à la densité de probabilité des temps de montée expérimentaux des événements EM transitoires.

Sur la Fig. 3. 23. on présente la densité de probabilité expérimentale de DT. L'axe des abscisses donne les durées temporelles des événements transitoires comprises entre 0.4 ns et 20 ns et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Chaque barre de la Fig. 3. 23. fait correspondre la densité de probabilité des durées temporelles qu'elle couvre.

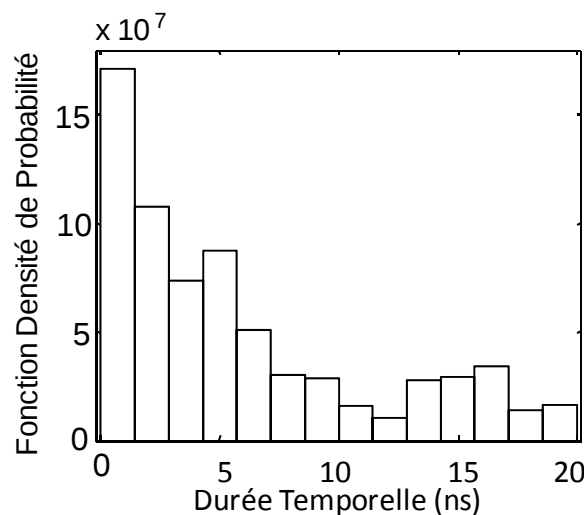


Fig. 3. 23. Densité de probabilité expérimentale des DT des événements EM transitoires mesurés par une antenne GSM-R fixée à bord d'un train en mouvement

Dans la suite de cette partie, on se propose de modéliser la distribution des temps de montée obtenue d'une manière expérimentale par une loi de distribution statistique connue.

Des tests réalisés à l'aide du logiciel MATLAB nous ont permis de modéliser la fonction densité de probabilité expérimentale des durées par la densité de probabilité d'une loi exponentielle dont l'expression est donnée par l'équation 3.3.

$$f\left(\frac{DT}{\lambda}\right) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{DT}{\lambda}\right) \quad 3.3.$$

Avec DT la durée temporelle, et $\lambda = 5.93.10^{-9}$, λ est appelée paramètre de la distribution exponentielle et a été déterminée par la méthode du maximum de vraisemblance avec 95 % d'intervalle de confiance.

La durée temporelle des événements EM transitoires observés par l'antenne GSM-R est donc distribuée selon une loi exponentielle.

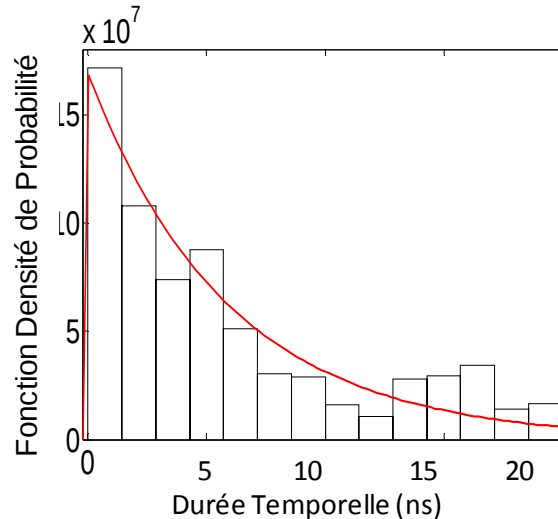


Fig. 3. 24. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Durées temporelles des événements EM transitoires

La Fig.3. 24. donne une superposition entre la densité de probabilité expérimentale des DT et la densité de probabilité empirique donnée par l'équation 3. 3.

L'axe des abscisses donne les durées temporelles et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Le graphe à barre donne la FDP expérimentale des durées temporelles et la courbe rouge donne la FDP empirique déterminée à partir de l'équation 3. 3.

La Fig. 3. 24., montre une correspondance assez satisfaisante entre la FDP expérimentale des DT des événements transitoires et la FDP de la loi exponentielle.

Des tests complémentaires réalisés à l'aide de la méthode de Kolmogorov-Smirnov utilisée principalement pour étudier la validité d'une loi statistique théorique choisie pour la modélisation d'une variable aléatoire obtenue expérimentalement, montre que la loi de weibull peut aussi modéliser le comportement des durées temporelles des événements EM transitoires. L'expression de la FDP de la loi de Weibull est donnée par l'équation 3. 5. dans la suite de ce chapitre.

En effet, lorsque le paramètre b de l'équation 3. 5. (définie dans la partie IV. 5 de ce chapitre) est égal à l'unité, la loi de weibull s'écrit sous la forme d'une loi exponentielle.

Les paramètres de la loi de Weibull seront décrits plus en détails dans la cinquième partie de ce paragraphe.

- Etude de la stabilité des durées temporelles

Lors de la campagne de mesure A présentée dans le chapitre 2, on a mesuré des événements EM transitoires à l'aide d'une antenne GSM-R similaire à celle utilisée lors de la campagne de mesure B. La même étude statique réalisée sur les DT, présentée plus haut, a été réalisée sur les résultats de la campagne de mesure A.

Cette étude montre que la distribution des durées temporelles mesurées lors de la campagne A peut être approximée par la même loi statistique que celle trouvée lors de la campagne de mesures B. De plus, les paramètres de la loi exponentielle trouvée sont presque constants pour les deux campagnes de mesure.

En effet, sur la campagne A, les durées temporelles sont distribuées selon une loi exponentielle avec $\lambda = 6.02.10^{-9}$ alors que sur la campagne B, λ est de l'ordre de $5.9.10^{-9}$

La Fig. 3.25. donne la FDP de la durée temporelle des événements EM transitoires observés à bord du train lors de la campagne A.

Le graphe à barres donne la FDP expérimentale de DT et la courbe rouge donne la FDP de la loi exponentielle précédemment citée.

On note une moins bonne concordance entre les distributions expérimentales et empiriques sur la campagne A. En effet, le nombre d'événements mesurés lors de cette campagne n'est que de 3700 alors qu'il était de l'ordre de 25000 pour la campagne de mesures B.

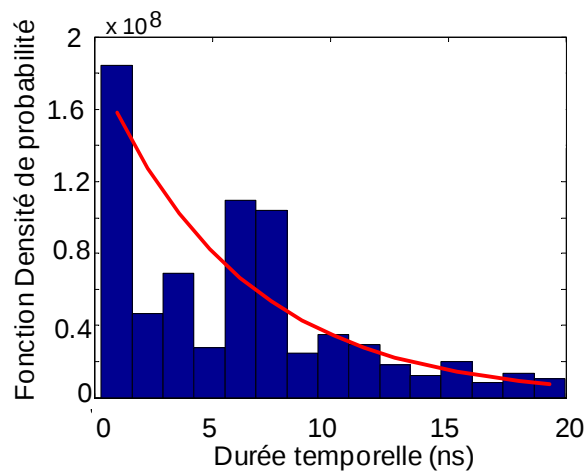


Fig. 3. 25. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Durées temporelles des événements EM transitoires mesurés lors de la campagne de mesure A

A travers l'étude statistique présentée précédemment, on note que les temps de montée et les durées gardent des distributions similaires sur les deux campagnes de mesure.

Il est donc légitime de penser que les conditions d'opération du train (vitesse, trajet, type de locomotive, conditions atmosphériques...etc.) n'ont aucune influence sur les caractéristiques statistiques des événements transitoires collectés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement.

3. Impact de la bande passante des antennes sur les caractéristiques temporelles des perturbations EM transitoires

On pense que la stabilité des caractéristiques statistiques des durées et des temps de montée des événements EM transitoires est potentiellement liée à la réponse des antennes de mesure. En effet, l'antenne GSM-R employée lors des deux campagnes de mesure n'a pas été modifiée. Ceci peut expliquer la stabilité des caractéristiques statistiques de TM et de DT, puisque l'antenne peut jouer le rôle d'un filtre passif qui peut figer les caractéristiques temporelles de temps de montée et de durée des événements EM collectés.

Par ailleurs, des investigations plus approfondies doivent être menées afin de déterminer la raison qui peut expliquer la stabilité des paramètres statistiques des caractéristiques temporelles des événements EM transitoires mesurées par les antennes GSM-R.

1. Impact de la bande passante des antennes sur les temps de montée

Dans une première étape d'investigation, nous avons essayé de comparer les distributions des temps de montée et des durées d'événements transitoires collectés par deux antennes GSM-R différentes (ayant des paramètres de réflexion différents).

A partir des résultats des mesures réalisées durant de la campagne B, nous avons comparé la distribution des temps de montée et des durées observées par une antenne GSM-R mono-bande (l'antenne 1 qui ne fonctionne que sur la bande de fréquence de fonctionnement du système GSM-R), avec la distribution des temps de montée et des durées des événements transitoires collectés par une antenne GSM-R bi-bandes (l'antenne 2 qui elle fonctionne sur les deux bandes du système GSM-R et du système Radio – Sol – Train).

La Fig. 3.26. donne une confrontation entre la fonction densité de probabilité expérimentale des temps de montée des événements EM transitoires collectés par l'antenne mono-bande (graphe à barres) et la fonction densité de probabilité empirique (courbe rouge) d'une loi Log-normale dont l'expression est donnée par l'équation 3. 2 avec $\mu = -22.1$ et $\sigma = 0.46$.

En comparant les FDP des temps de montée des événements EM transitoires observés par l'antenne mono-bande (Fig. 3. 26.) et l'antenne bi-bandes (Fig. 3. 20.), on remarque facilement que la densité des temps de montée les plus courts augmente sensiblement avec l'antenne mono-bande et baisse pour les temps de montée les plus longs.

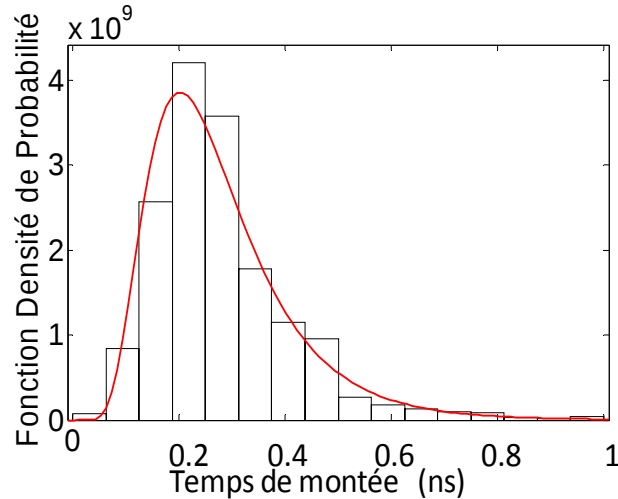


Fig. 3. 26. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Temps de montée des événements EM transitoires mesurés lors de la campagne de mesure A avec une antenne mono-bande (antenne 1)

En effet, avec l'antenne mono-bande la valeur typique des temps de montée des événements EM transitoires calculée se situe sur un intervalle 0.15 ns et 0.3 ns, alors qu'avec l'antenne bi-bande, la valeur typique des temps de montée se situe autour de 0.4 ns. Ceci s'explique principalement par le comportement « filtre » de l'antenne mono-bande sur la bande de fonctionnement du système Radio – Sol – Train (RST). En effet, les deux antennes ont le pouvoir de capter les événements qui couvrent la bande de fonctionnement du système GSM-R (les plus rapides), mais seule l'antenne bi-bandes peut capter les événements EM transitoires qui couvrent la bande de fonctionnement du système RST (les plus lents). Ainsi la densité des événements transitoires les plus rapides est plus importante avec l'antenne mono-bande comparée à une antenne bi-bandes.

Les temps de montée des événements EM transitoires captés par l'antenne bi-bandes sont généralement plus étalés dans le temps que ceux captés par l'antenne mono-bande. En effet, les valeurs de temps de montée qui ont une densité de probabilité supérieure à 1.10^9 sont comprises entre 0.1 ns et 0.4 ns pour l'antenne mono-bande, et 0.2 ns et 0.65 ns pour l'antenne bi-bandes.

On peut donc supposer dans cette partie, que la stabilité de la distribution des temps de montée des événements EM transitoires observés par l'antenne bi-bandes sur la campagne de mesure A et la campagne de mesure B peut être principalement due à la réponse de l'antenne de mesure utilisée. Des tests supplémentaires doivent par ailleurs être effectués pour confirmer ces résultats.

2. Impact de la bande passante des antennes sur les durées

La Fig. 3. 27. donne une confrontation entre la fonction densité de probabilité expérimentale des DT mesurées aux bornes d'une antenne mono-bande (graphe à barres) et la fonction densité de probabilité empirique (courbe rouge) d'une loi Log-normale dont l'expression est donnée par l'équation 3. 3 qui approche le mieux la fonction expérimentale, avec λ de l'ordre de $2.85.10^{-9}$.

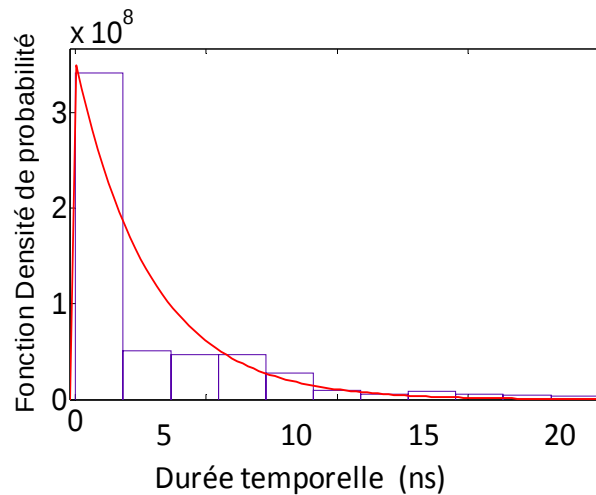


Fig. 3. 27. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des Durées temporelles des événements EM transitoires mesurés lors de la campagne de mesure A avec une antenne mono-bande (antenne 1)

En comparant les FDP des durées temporelles des événements EM transitoires observés par l'antenne mono-bande (Fig. 3. 27) et l'antenne bi-bandes (Fig. 3. 24), on remarque que la densité des durées temporelles les plus courtes augmente sensiblement avec l'antenne mono-bande et baisse pour les durées les plus longues. En effet, avec l'antenne mono-bande la valeur typique des durées temporelles des événements EM transitoires calculée se situe principalement autour de 1 ns, alors que la valeur typique est de l'ordre de 4 ns avec l'antenne bi-bande.

Ceci s'explique par les mêmes raisons que celles évoquées précédemment pour les temps de montée, notamment le comportement « filtre » de l'antenne mono-bande sur la bande de fonctionnement du système Radio – Sol – Train (RST).

On observe que les durées temporelles des événements EM transitoires captés par l'antenne bi-bandes sont généralement plus étalées dans le temps que celles observées par l'antenne mono-bande. En effet, presque la totalité des valeurs de durées temporelles obtenues par l'antenne mono-bande a une densité supérieure à $0.5.10^8$. Avec l'antenne bi-bandes, cette valeur de densité n'a été dépassée que pour les durées comprises entre 0.4 ns et 1.7 ns.

On peut donc supposer dans cette partie que la stabilité de la distribution des durées temporelles des événements EM transitoires observés par l'antenne bi-bandes sur la campagne de mesure A et la campagne de mesure B peut être principalement due à la réponse de l'antenne de mesure utilisée. Comme pour les temps de montée, des tests supplémentaires doivent néanmoins être effectués pour confirmer ces résultats.

4. Etude statistique des Amplitudes crêtes (A) des événements EM transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement

L'étude des amplitudes crêtes (A) des événements transitoires observés par les antennes GSM-R à bord des trains est très délicate pour plusieurs raisons, notamment la dépendance des amplitudes crêtes avec la distance qui sépare l'antenne de mesure du pantographe.

Dans cette partie, on ne donnera donc pas les caractéristiques statistiques typiques des amplitudes crêtes des perturbations transitoires observées dans le domaine ferroviaire, mais on essaiera de donner les tendances qu'elles peuvent suivre selon les conditions de mesures.

Nous verrons aussi dans le quatrième chapitre que les valeurs pics des événements transitoires n'ont pas une très grande influence sur les résultats d'immunité obtenus à partir de la méthode d'étude de l'immunité du système GSM-R que nous proposons.

L'analyse menée dans ce paragraphe vise principalement à compléter notre connaissance des perturbations transitoires produites par les pertes de contact entre la caténaire et le pantographe.

Les difficultés rencontrées lors de la mesure des valeurs pics se décomposent en deux parties :

- La méconnaissance préalable des amplitudes crêtes qu'on peut obtenir lors d'une mesure à bord d'un train le long d'un trajet complet : en raison de ce manque d'information, lors des mesures, on a collecté un nombre important d'événements transitoires dont l'amplitude a été écrêtée par l'oscilloscope. Ceci est dû à l'échelle des amplitudes appliquée et qui a été fixée selon les premiers événements transitoires collectés au début de la mesure. Donc, les transitoires écrêtés collectés lors des trajets ne peuvent pas être exploités pour l'étude statistique des amplitudes crêtes.
- L'importante variation des amplitudes crêtes en fonction du système d'électrification du train ainsi que la position de l'antenne GSM-R par rapport au pantographe : ce point sera discuté plus en détail dans la suite de ce paragraphe.

Dans une première partie, on se propose à titre d'illustration d'étudier la distribution de 4910 événements transitoires mesurés à 80 m du pantographe.

L'étude précédente de l'étalement des Amplitudes crêtes (A) de ces événements EM transitoires, a montré que l'amplitude crête minimale des événements transitoires qu'on a pu mesurer à bord d'un train en mouvement est de l'ordre 26 mV et l'amplitude crête maximale est de l'ordre de 0.5 V.

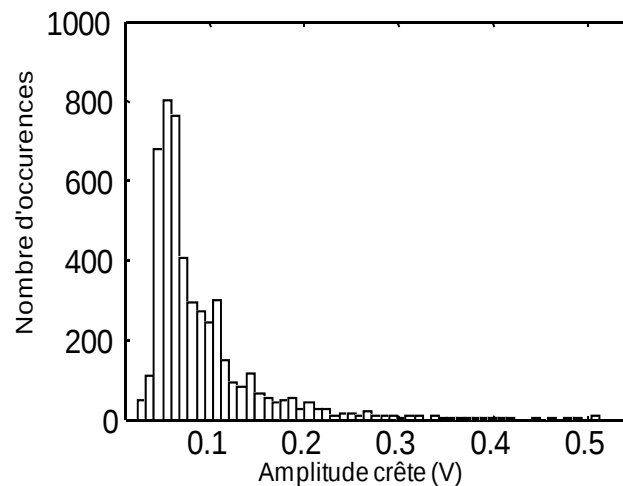


Fig. 3. 28. Histogramme des amplitudes crêtes de 4900 événements EM transitoire collectés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du train

La Fig. 3. 28. donne l'histogramme des amplitudes crêtes des événements EM transitoires collectés lors de la mesure. On précise ici qu'on présente l'histogramme des amplitudes crêtes des 4900 événements EM transitoires mesurés à l'aide d'un oscilloscope qui a été configuré pour mesurer des événements électromagnétiques transitoires qui apparaissent avec des amplitudes crêtes maximales de 0.5 V.

L'axe des abscisses de la Fig. 3. 28. donne l'étalement des amplitudes crêtes des événements EM transitoires et l'axe d'ordonnée donne un nombre d'occurrences.

Chaque barre de la Fig. 3. 28. donne une correspondance entre les valeurs des amplitudes crêtes qu'elles couvrent et le nombre d'occurrence des événements EM transitoires qui apparaissent avec ces valeurs crêtes.

L'étude de ces valeurs, montre que la majorité des événements EM transitoires ont une amplitude crête comprise entre 50 mV et 60 mV et une valeur moyenne de 85 mV sur la totalité des transitoires. Le nombre d'occurrences des événements EM transitoires qui apparaissent avec des amplitudes situées de part et d'autre de cet intervalle baisse sensiblement.

Comme pour les paramètres temporels, on a étudié la densité de probabilité des amplitudes crêtes observées durant cette mesure.

La densité de probabilité de l'amplitude crête, supposée être une variable aléatoire, peut être déterminée par le rapport entre la probabilité d'apparition des amplitudes crêtes et une variation faible des valeurs des amplitudes crêtes.

Comme pour le temps de montée, à partir de l'histogramme des amplitudes crêtes présenté sur la Fig. 3. 28. on peut remonter à la densité de probabilité expérimentale de A lorsque les différentes classes des valeurs qui composent l'histogramme sont suffisamment étroites par rapport à l'étalement des amplitudes crêtes.

Dans notre cas, les classes sont présentées par les barres.

Puisque la largeur des classes qui composent l'histogramme des Amplitudes crêtes est très petite par rapport à l'étalement des amplitudes crêtes observées à bord du train, il est possible de remonter à partir de cet histogramme à la densité de probabilité des Amplitudes crêtes expérimentales des événements EM transitoires.

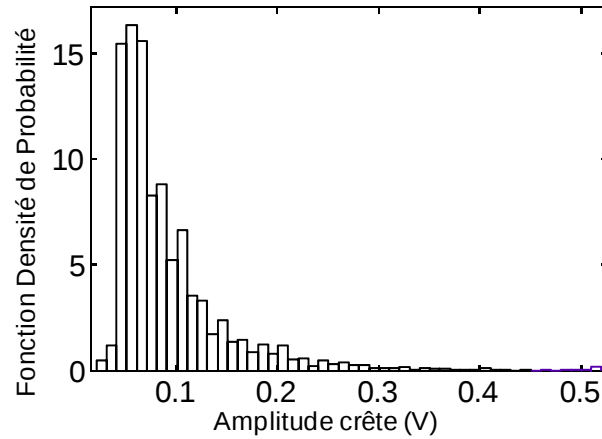


Fig. 3. 29. Densité de probabilité expérimentale des amplitudes crêtes des événements transitoires mesurées par une antenne GSM-R fixée à bord d'un train en mouvement

La Fig. 3. 29. donne la densité de probabilité expérimentale des Amplitudes crêtes. L'axe des abscisses donne l'amplitude crête des événements transitoires comprise entre 26 mV et 0.5 V et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Chaque barre de la Fig. 3. 29. fait correspondre la densité de probabilité des amplitudes crêtes qu'elle couvre sur l'axe des abscisses.

Des tests réalisés à l'aide du logiciel MATLAB ont permis de modéliser la fonction densité de probabilité expérimentale des amplitudes crêtes par la densité de probabilité d'une loi généralisée de valeurs extrêmes (*Generalized Extreme Value* GEV) dont l'expression est donnée par l'équation 3. 4.

A est l'amplitude crête, μ est le paramètre de position, σ le paramètre de dispersion et ξ le paramètre de forme. μ , σ et ξ sont appelés les paramètres de la loi généralisée des valeurs extrêmes

$$f(A; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{A - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi} - 1} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{A - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\} \quad 3. 4.$$

Avec $\mu = 0.06$, $\sigma = 0.02$, et $\xi = 0.37$. μ , σ et ξ ont été déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance avec 95 % d'intervalle de confiance.

Donc les amplitudes crêtes des événements EM transitoires captés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement sont distribuées selon une loi généralisée des valeurs extrêmes.

La Fig.3. 30. donne une superposition entre la densité de probabilité expérimentale de A et la densité de probabilité empirique donnée par l'équation 3.4.

L'axe des abscisses donne les amplitudes crêtes et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Le graphe à barre donne la FDP expérimentale de A et la courbe rouge donne la FDP empirique déterminée à partir de l'équation 3. 4.

La Fig. 3. 30. montre une correspondance assez satisfaisante entre la FDP expérimentale de A des événements transitoires et la FDP de la loi généralisée de valeurs extrêmes.

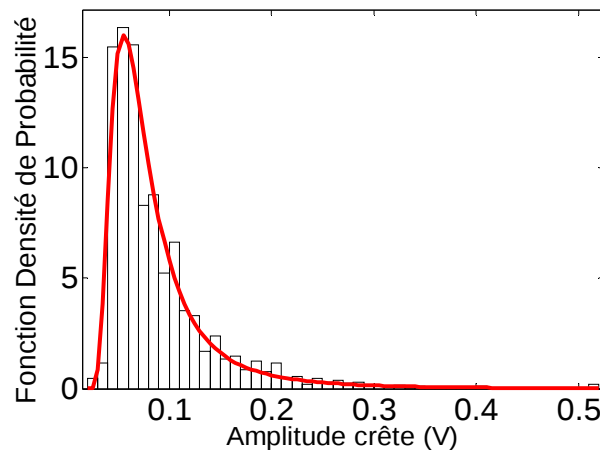


Fig. 3. 30 Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des amplitudes crêtes des événements EM transitoires

On rappelle ici que cette distribution peut varier selon les conditions d'opération du train et de la position de l'antenne.

Pour mettre en exergue l'impact de la distance qui sépare l'antenne GSM-R du pantographe sur A, on a choisi de présenter les amplitudes crêtes de 1700 événements transitoires collectés séparément sous les mêmes conditions d'opération mais avec une antenne GSM-R fixée à 80 mètres du pantographe et puis à 20 mètres du pantographe.

La Fig. 3.31. (a) donne les amplitudes crêtes des événements transitoires collectés par une antenne GSM-R située à 20 mètres du pantographe. La Fig. 3. 31. (b) donne les amplitudes crête des événements transitoires collectés à 80 mètres du pantographe. Sur chaque figure, l'axe des abscisses donne l'ordre des événements transitoires et l'axe des ordonnées donne les amplitudes crêtes. Chaque point présenté en bleu sur la Fig. 3. 31. fait correspondre l'amplitude crête de l'événement transitoire à son ordre d'apparition.

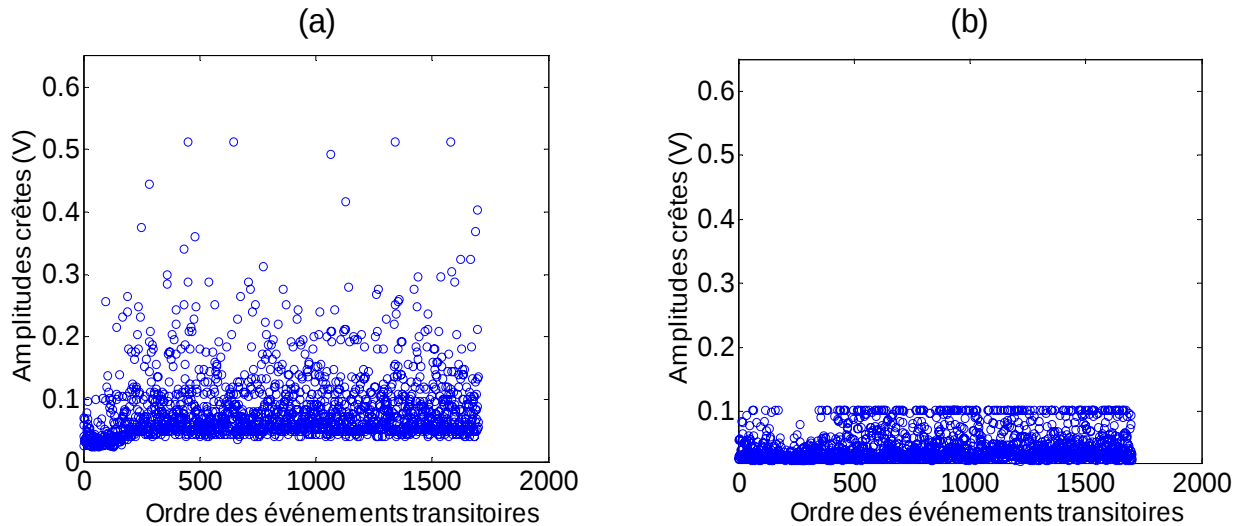


Fig. 3.31. Amplitude crête des événements transitoires collectés à 20 mètres du pantographe (a) et à 80 mètres du pantographe (b)

La Fig. 3.31 (a) montre que les amplitudes crêtes des événements transitoires collectés à 20 mètres du pantographe peuvent monter jusqu'à 0.51 V alors qu'elle n'atteint que 0.11 V à 80 mètres du pantographe.

Néanmoins, on note ici que les valeurs crêtes mesurées à 80 mètres du pantographe ont été écrêtées par l'oscilloscope puisque l'échelle d'amplitude qu'on a fixée sur l'oscilloscope ne permettait pas de mesurer des amplitudes crêtes supérieures à 0.1 V. En effet, la majorité des événements transitoires mesurés à 80 mètres ont une amplitude crête de l'ordre de 0.05 V et afin d'assurer une bonne précision de mesure de ces amplitudes, on a choisi de limiter l'échelle maximale de l'oscilloscope à 0.1 V.

Par ailleurs, on peut noter que pour une antenne GSM-R fixée à 80 mètres du pantographe, seuls 9 % des amplitudes crêtes mesurées sont supérieures à 0.1 V (correspondant aux valeurs écrêtées).

D'un autre côté, le problème d'écrêtage ne s'est pas posé pour les mesures réalisées à 20 mètres du pantographe, puisque les amplitudes crêtes des événements transitoires collectés à cette distance montent facilement au-dessus de 0.1 V et le pourcentage d'apparition de ces transitoires a atteint 26 % sur les 1700 transitoires étudiés dans cette partie.

Ceci montre que la distance entre l'antenne de mesure et le pantographe a une influence sur les tendances que peuvent suivre les amplitudes crête des événements transitoires, et on observe facilement une baisse de l'amplitude A lorsque l'antenne s'éloigne de la position du pantographe et une hausse lorsque l'antenne s'y rapproche.

Pour comprendre les raisons qui peuvent expliquer l'impact de la position de l'antenne par rapport au pantographe sur les amplitudes crêtes des événements transitoires, on s'est intéressé dans un premier temps à l'arc électrique qui apparaît lors de la perte de contact entre

la caténaire et le pantographe puis on s'est penché sur l'influence des courants importants qui circulent sur la caténaire et les différents éléments du pantographe (archet, bras, câble de jonction). Sans oublier l'influence de ces courants ainsi que la ligne de toiture qui permet l'alimentation électrique des différents wagons du train.

- Arc électrique

Pour identifier l'influence de l'arc électrique qui apparaît entre la caténaire et le pantographe sur les amplitudes crêtes, une étude préliminaire a été menée en laboratoire.

Afin d'effectuer des mesures en laboratoire, on a mis en œuvre une structure ayant des propriétés qui s'approchent de la caténaire et permettant de simuler l'influence des arcs électriques.

Ainsi, la ligne à haute tension a été simulée par un câble électrique de 20 mètres de long et située à un mètre du sol. Cette étude, consistait à provoquer une décharge électrique en un point fixe sur cette ligne et nous avons déplacé une antenne GSM-R, connectée à un oscilloscope numérique, le long de cette ligne. Ce banc de test est présenté sur la Fig. 3. 32.

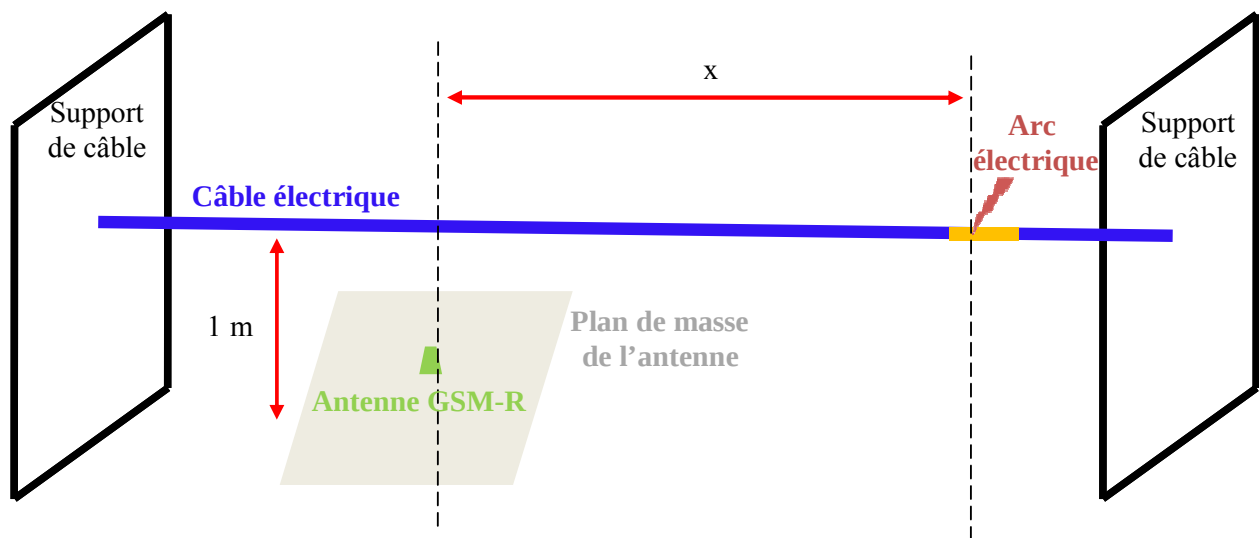


Fig. 3. 32. Banc de mesure réalisé en vue d'étudier l'influence de la position de l'antenne par rapport à l'arc électrique sur les amplitudes crêtes des événements transitoires collectés

Afin de produire les arcs électriques, on a utilisé un pistolet à décharges électrostatiques dont on dispose au laboratoire, qui permettait de générer un arc électrique sur un point fixe sur la ligne, situé à une distance x de l'antenne GSM-R, telle que cela est présenté sur la Fig. 3. 32.

L'antenne a été déplacée le long de la ligne et les mesures ont été effectuées sur différentes positions. A chaque position, on a mesuré le champ électromagnétique reçu par l'antenne lors de l'apparition de 100 décharges successives sur la ligne.

Les résultats collectés ont montré que la position de l'antenne par rapport au point d'application de la décharge électrique n'avait aucun impact sur les amplitudes crêtes collectées, en revanche d'autres mesures ont montré une différence en fonction de la position de l'antenne par rapport à la ligne lorsqu'on se déplaçait orthogonalement par rapport à cette dernière.

A partir de là, on comprend que l'arc électrique en lui-même n'a aucune influence sur les amplitudes des perturbations EM reçues par l'antenne GSM-R à bord d'un train, en revanche les bruits EM reçus semblent venir du rayonnement de tous les éléments métalliques qui subissent cette variation brutale de courant électrique au moment de l'apparition de l'arc électrique, à savoir le pantographe, la caténaire, la ligne de toiture...etc.

Dans la suite on s'est focalisé sur le comportement du pantographe aux fréquences de fonctionnement du système GSM-R.

- Le pantographe

N'ayant pas à notre disposition un pantographe, nous nous sommes tournés vers l'utilisation des outils numériques pour mettre en évidence le comportement d'un pantographe disposé au-dessus d'un plan de masse, sur une bande de fréquence proche de la bande de fonctionnement du système GSM-R. L'impact du bruit généré par le rayonnement du pantographe sur les niveaux mesurés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du plan de masse a été aussi abordé. Les simulations présentées dans ce paragraphe sont extraites des travaux réalisés par Fatima MORENO [III-6] au sein du laboratoire à l'aide du logiciel Wipl-D.

La configuration utilisée lors de ces simulations est donnée sur la Fig. 3. 33.

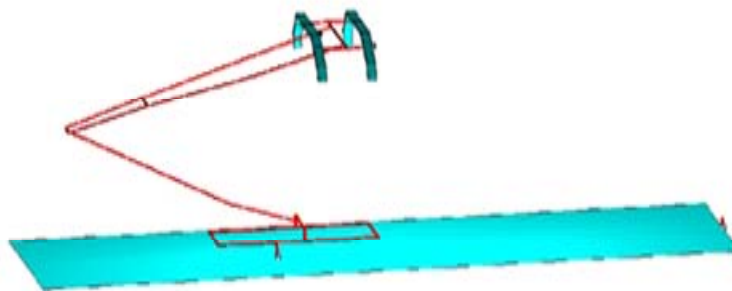


Fig. 3. 33. Configuration du test réalisé avec le logiciel WIPL-D

En utilisant le logiciel Wipl-D, nous avons malheureusement rencontré des difficultés pour modéliser l'apparition d'un événement transitoire sur l'archet du pantographe. Pour identifier

les éléments qui peuvent générer des perturbations EM, lors de l'apparition des événements transitoires, sur l'antenne GSM-R nous avons alors choisi d'observer la distribution de courant généré par une onde EM plane sur les différents éléments de la Fig. 3. 33.

Pour cela, nous avons choisi lors de la simulation d'illuminer le dispositif donné par la Fig. 3. 33. par une onde EM plane, avec $\|E\| = 1$ V/m et une direction de propagation perpendiculaire au plan de l'archet. Le choix de cette direction de propagation permet d'assurer un couplage hybride entre l'onde et l'archet. On verra dans la suite l'importance de l'impact de cet élément sur les bruits collectés par l'antenne sur la bande de fonctionnement du système GSM-R.

La Fig. 3. 34. donne la distribution du courant électrique en code couleurs sur les différentes parties métallisées du pantographe et sur l'antenne GSM-R à 900 MHz. La couleur rouge pour les courants les plus élevés et la couleur bleue pour les plus faibles.

On voit qu'à cette fréquence, l'élément du pantographe qui reçoit le plus de champs à cette fréquence est l'archet du pantographe. L'antenne GSM-R réceptionne aussi presque le même niveau de champs que l'archet.

Ainsi, on pense que le niveau de bruit EM récupéré par une antenne GSM-R située au-dessus d'un train est lié au niveau de bruit EM que peut rayonner l'archet du pantographe lors de l'apparition d'un événement transitoire.

Ainsi, nous pensons que la position de l'antenne par rapport à l'archet peut jouer sur les niveaux de bruit collectés dans la bande de fonctionnement du système GSM-R. Des études complémentaires doivent être réalisées pour confirmer ces résultats et étendre le raisonnement sur les câbles de toitures du train, de la caténaire...etc.

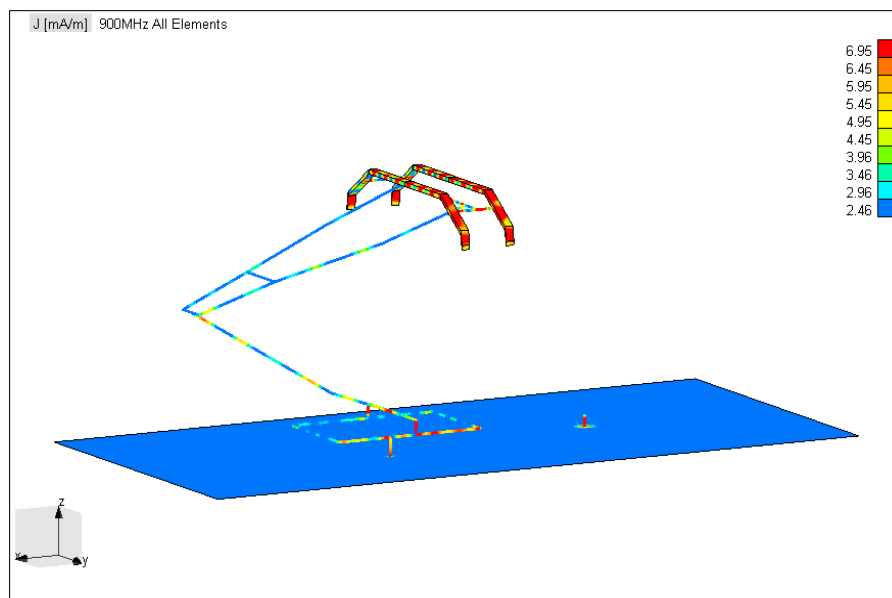


Fig. 3. 34. Distribution de courant collecté sur les différents éléments d'un pantographe et une antenne GSM-R lorsqu'ils sont illuminés par une onde plane de direction de propagation perpendiculaire au plan de l'archet

5. Etude statistique des intervalles de temps (IT) qui séparent l'apparition des événements EM transitoires successifs observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du toit d'un train en mouvement

L'étude précédente (partie III de ce chapitre) de l'étalement temporel des intervalles de temps (IT) qui séparent l'apparition des événements EM transitoires successifs a montré que les intervalles de temps sont compris entre $0.7 \mu\text{s}$ et $360 \mu\text{s}$ et une valeur moyenne de l'ordre de $100 \mu\text{s}$.

Pour identifier les valeurs typiques des IT des événements EM transitoires observés à bord d'un train en mouvement par une antenne GSM-R, la Fig. 3. 35. montre la fonction densité de probabilité des IT sur la totalité de leur gamme temporelle. Le même raisonnement appliqué pour les caractéristiques temporelles (TM, DT) et d'amplitude a été appliqué pour obtenir cette densité.

L'axe des abscisses de la Fig. 3. 35. donne l'étalement temporel des IT des événements EM transitoires et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité.

Chaque barre de la Fig. 3. 35. donne une correspondance entre l'intervalle de temps qu'elle couvre et sa densité de probabilité.

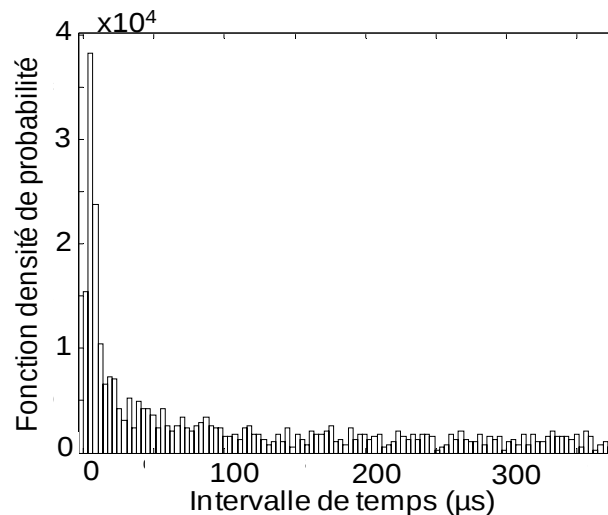


Fig. 3. 35. Histogramme des intervalles de temps des événements EM transitoires collectés par une antenne GSM-R fixée au-dessus du train

L'étude des intervalles de temps montre que la majorité des IT est comprise entre $6 \mu\text{s}$ et $13 \mu\text{s}$. En dehors de cet intervalle, la densité d'apparition des IT des événements EM transitoires baisse sensiblement.

Par ailleurs, et comme cela a été dit précédemment pour les différentes caractéristiques temporelles et d'amplitude des événements transitoires, il faut que les tests d'immunité soient effectués à l'aide de signaux tests ayant des IT comparables à ce qu'on a pu observer à bord d'un train en mouvement le long d'un trajet ferroviaire.

On verra dans le quatrième chapitre, que ce paramètre a une grande importance sur l'immunité du système GSM-R face aux rafales d'événements transitoires. En effet, les événements transitoires qui apparaissent avec des IT courts par rapport à la durée d'émission d'un burst GSM-R (577 μ s) risquent d'être très pénalisants pour le système GSM-R.

Se limiter à une génération de signaux tests composés d'événements transitoires qui apparaissent avec des IT seulement compris entre 4 μ s et 13 μ s ne revient pas à exposer le système GSM-R à des signaux tests représentatifs de ce qu'on observe réellement le long d'un trajet à bord d'un train en mouvement.

Comme précédemment, l'idée qu'on se propose de développer dans cette partie consiste à modéliser la fonction densité de probabilité expérimentale des IT par une fonction densité de probabilité qu'on appellera empirique et extraite d'une loi de distribution théorique connue avec des paramètres permettant d'approximer au mieux la distribution expérimentale.

Des tests réalisés à l'aide du logiciel MATLAB nous ont permis de modéliser la fonction densité de probabilité expérimentale des IT par la densité de probabilité d'une loi de Weibull dont l'expression est donnée par l'équation 3. 5.

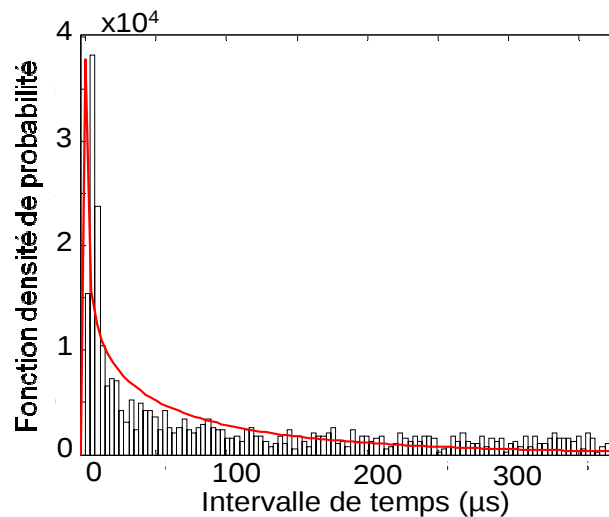


Fig. 3. 36. Densités de probabilité expérimentale (graphe à barres) et empirique (courbe rouge) des intervalles de temps des événements EM transitoires

IT est l'intervalle de temps, a le paramètre d'échelle et b le paramètre de forme.

$$f\left(\frac{IT}{a}, b\right) = b \cdot a^{-b} \cdot IT^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{IT}{a}\right)^b} \quad 3.5$$

Avec $a = 9.22 \cdot 10^{-5}$ et $b = 0.77$. a et b sont appelés paramètres de la distribution de Weibull et ont été déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance avec 95 % d'intervalle de confiance.

La Fig.3. 36. donne une superposition entre la densité de probabilité expérimentale des intervalles de temps et la densité de probabilité empirique donnée par l'équation 3. 5.

L'axe des abscisses donne les IT et l'axe des ordonnées donne la densité de probabilité. Le graphe à barres donne la FDP expérimentale des IT et la courbe rouge donne la FDP empirique déterminée à partir de l'équation 3. 5.

La Fig. 3. 36., montre une correspondance assez satisfaisante entre la FDP expérimentale des IT des événements transitoires et la FDP de la loi de Weibull.

On précise ici que les paramètres de distribution des IT peuvent varier sensiblement en fonction des conditions d'opération du train (vitesse du train par exemple). Les paramètres de cette loi de distribution ne sont donc pas représentatifs de ce qu'on peut rencontrer typiquement dans le domaine ferroviaire. Chaque ligne a ses propres caractéristiques, et en fonction des conditions d'opération sur cette ligne, les paramètres de distribution des IT peuvent changer sensiblement. Il faudrait adapter les paramètres de la loi de Weibull pour chaque ligne ferroviaire sur laquelle le système GSM-R sera installé.

V. CONCLUSION

L'étude statistique des paramètres temporels et d'amplitude des événements transitoires collectés par une antenne GSM-R à bord d'un train en mouvement montre que ces différents paramètres sont très variables et peuvent dépendre des conditions d'opération du train, des caractéristiques de la ligne, de la réponse de l'antenne de mesure et de sa position, de la méthode et la configuration de mesure...etc.

Les distributions qui ont été présentées ici peuvent donc être considérées comme des indicateurs des paramètres temporels et d'amplitude des événements transitoires mais restent aussi discutables.

Cette étude a été réalisée dans le but de faire des tests d'immunité d'un système GSM-R face aux événements transitoires qu'il peut rencontrer à bord d'un train. On a donc voulu élaborer des signaux tests représentatifs de conditions d'opération réelles et adaptés au contexte des systèmes numériques tel que le système GSM-R. En tenant compte des caractéristiques temporelles de son protocole et ses capacités à résister à quelques perturbations EM.

On pense donc exploiter les résultats obtenus dans ce chapitre afin de définir les signaux à employer lors des tests d'immunité.

Un choix doit donc se faire en fonction des données qu'on a collectées et les caractéristiques du protocole de communication du système GSM-R :

- 1- On peut utiliser des signaux tests composés de rafales d'événements transitoires ayant des caractéristiques représentatifs du pire cas. Cependant, ce type de signaux peut être trop contraignant pour le système GSM-R et correspond à des conditions d'opération très rares, non représentatives de la réalité. Ce choix n'a donc pas été retenu.
- 2- On doit prendre en compte les spécificités du système GSM-R, à savoir son pouvoir à résister à certaines perturbations en corrigeant quelques bits erronés. Pour cela on pense qu'il faut varier l'ensemble des caractéristiques des événements transitoires qui composent les signaux tests tels qu'ils varient dans la réalité. Ainsi, on pourra observer des périodes de temps où le système GSM-R saura compenser l'effet des perturbations EM transitoires qu'il subit.
- 3- D'autre part, il faut aussi se placer dans le contexte ferroviaire, où le système GSM-R doit assurer convenablement ses fonctions sans mettre en danger la continuité et la sécurité du trafic ferroviaire. Ce qui importe donc dans ce contexte, c'est que si l'intégrité du système GSM-R est affectée, il faut que cette défaillance soit la plus courte possible et il faut qu'elle ne se reproduise pas fréquemment sur la durée d'un trajet. Généralement, les opérateurs et industriels du domaine ferroviaire estiment que le système GSM-R peut assurer ses fonctions tant que le Taux d'Erreur Binaire (noté BER qui sera expliqué plus en détail dans le quatrième chapitre) est inférieur à 1.13 %.

Ainsi, il faut impérativement faire varier les caractéristiques des événements transitoires. L'avantage de les faire varier au cours du temps sur un test d'immunité est que l'on peut dès lors envisager des critères d'immunité bien plus fonctionnels. On pourra notamment observer sur quel pourcentage du temps, la qualité de transmission est suffisante face à un scénario de bruit balayant toutes les caractéristiques de bruits observés.

Chapitre 4

Immunité EM du système GSM-R confronté aux perturbations EM transitoires

Résumé : Ce chapitre vise à étudier les paramètres à contrôler pour évaluer l'immunité du système GSM-R face à des perturbations EM transitoires telles que celles observées à bord d'un train en mouvement. Ainsi, dans la première partie on introduira les méthodes employées actuellement en CEM pour l'étude de l'immunité des systèmes électroniques face à des perturbations transitoires. On verra pour quelles raisons ces méthodes ne sont pas adaptées à l'étude de l'immunité du système GSM-R et pourquoi un nouveau banc de test a été développé au sein du laboratoire. Nous présentons par la suite l'impact des caractéristiques temporelles des événements transitoires sur leur couverture spectrale dans la bande de fonctionnement du système GSM-R. Dans la dernière partie du chapitre on utilisera le banc de test pour étudier l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires en observant l'évolution du BER des transmissions GSM-R face à des scénarios de bruits représentatifs de ceux observés à bord d'un train. On pourra alors identifier les facteurs les plus influents sur la qualité des transmissions.

Sommaire :

I. METHODES EMPLOYEES POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DES SYSTEMES ELECTRONIQUES FACE A DES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES.....	139
II. DISCUSSION SUR LES SIGNAUX TESTS A APPLIQUER POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R.....	143
III. ANALYSE DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES RESULTATS DE TEST D'IMMUNITE.....	153
IV. VARIATIONS DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES TESTS D'IMMUNITE POUR ETRE REPRESENTATIF DES CONDITIONS REELLES.....	162

I. METHODES EMPLOYEES POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DES SYSTEMES ELECTRONIQUES FACE A DES PERTURBATIONS EM TRANSITOIRES

1. Méthodes actuelles

La seule norme actuelle permettant l'étude de l'immunité des systèmes électroniques ou de télécommunication face aux perturbations EM transitoires est la norme EN 61000-4-4.

La norme EN 61000-4-4 préconise l'utilisation du mode conduit pour injecter les signaux de perturbation EM transitoires sur les différents ports de l'équipement sous test en utilisant une pince de couplage capacitive. Si on souhaitait utiliser cette méthode pour étudier l'immunité des transmissions GSM-R, la pince de couplage capacitive devrait alors être positionnée autour du câble situé entre l'antenne GSM-R et le mobile GSM-R.

La Fig. 4. 1. donne le schéma du banc de test de l'immunité tel qu'il est décrit dans la norme EN 61000-4-4 et adapté au contexte du système GSM-R.

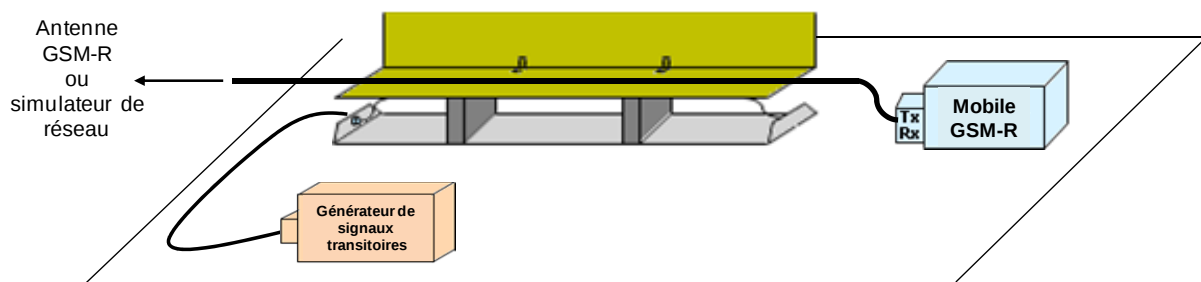


Fig. 4. 1. Banc de test d'immunité du système GSM-R face aux transitoires électriques rapides en salves

Le générateur de bruit produit des salves d'événements transitoires qui sont injectées sur le câble situé entre l'antenne GSM-R et le mobile GSM-R via un coupleur composé d'une pince de couplage capacitive.

Le mode d'injection des perturbations transitoires basé sur l'utilisation d'une pince de couplage capacitive, comme le préconise la norme EN 61000-4-4, est prévu pour l'étude des perturbations conduites par les câbles mais n'est pas adapté à l'étude de l'immunité EM du système GSM-R confronté aux perturbations rayonnées à bord d'un train en mouvement, en l'occurrence les événements transitoires qui apparaissent entre caténaire et pantographe.

En effet, l'utilisation de la pince de couplage rend difficile le contrôle du niveau de bruit EM arrivant sur le canal de communication du système GSM-R. De plus, la pince de couplage présentée dans la norme a été initialement pensée pour injecter des signaux de test dont les valeurs des caractéristiques temporelles sont très différentes des valeurs des caractéristiques temporelles des signaux transitoires que réceptionne le système GSM-R.

Sur le tableau Tab. 4. 1. on compare les caractéristiques temporelles des événements EM transitoires données par la norme EN 61000-4-4 et les caractéristiques temporelles des événements transitoires telles que les voient les antennes GSM-R fixées au-dessus d'un train en mouvement.

	EN 61000-4-4 (1)	Train (2)	Comparaison
Temps de montée	5 ns $\pm$ 30 %	0.4 ns	$RT(1) \gg RT(2)$
Durée	50 ns $\pm$ 30 %	5 ns	$TD(1) \gg TD(2)$
Intervalle de temps	0.2 ms et 0.4 ms	25 μ s	$TI(1) \gg TI(2)$

Tab. 4. 1. Comparaison entre les caractéristiques temporelles des perturbations EM transitoires observées à bord d'un train et celles données par la norme EN 61000-4-4

Ce Tableau montre un décalage important entre les caractéristiques temporelles des transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement et les valeurs données par la norme EN 61000-4-4. En effet, les événements EM transitoires observés par une antenne GSM-R à bord d'un train sont plus rapides que ceux définis par la norme. Or, on verra dans la suite de ce chapitre, que l'amplitude de bruit EM généré par les événements transitoires sur la bande de fonctionnement du système GSM-R est liée à leurs caractéristiques temporelles. Ainsi, les signaux transitoires décrits par cette norme ne peuvent pas être utilisés pour une étude pertinente de l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires rencontrées à bord d'un train en mouvement. Il est donc nécessaire de définir de nouveaux signaux de test avec des caractéristiques temporelles semblables à celles observées à bord d'un train. Une discussion sur la forme et la composition des signaux de test sera présentée dans la partie suivante de ce chapitre.

Le choix s'est donc porté sur la mise en œuvre d'un banc de test dédié spécialement à l'étude de l'immunité d'un système GSM-R face aux perturbations électromagnétiques qu'il peut rencontrer au sein de l'environnement ferroviaire.

2. Banc de test mis en œuvre au sein du laboratoire

Ce banc a été développé et mis en œuvre au sein du laboratoire par Stephen DUDOYER et Ricardo ADRIANO [IV-1].

L'élaboration de ce banc de test a été initialement pensée pour l'étude des effets des interférences électromagnétiques ramenées sur le canal de communication du système GSM-R par les canaux adjacents utilisés par le système GSM public, ainsi que les bruits EM transitoires générés lors d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe.

La Fig. 4. 2. donne la configuration du banc de test de l'immunité du système GSM-R.

Sur ce banc, le mobile GSM-R dont on dispose a été connecté (comme le montre la Fig. 4. 2.) à un CMU 200 [IV-2], qui permet de simuler une station de base GSM-R, permettant d'une part d'établir une communication avec le mobile et d'autre part de récupérer plusieurs données et paramètres déterminants pour estimer la qualité des communications GSM-R.

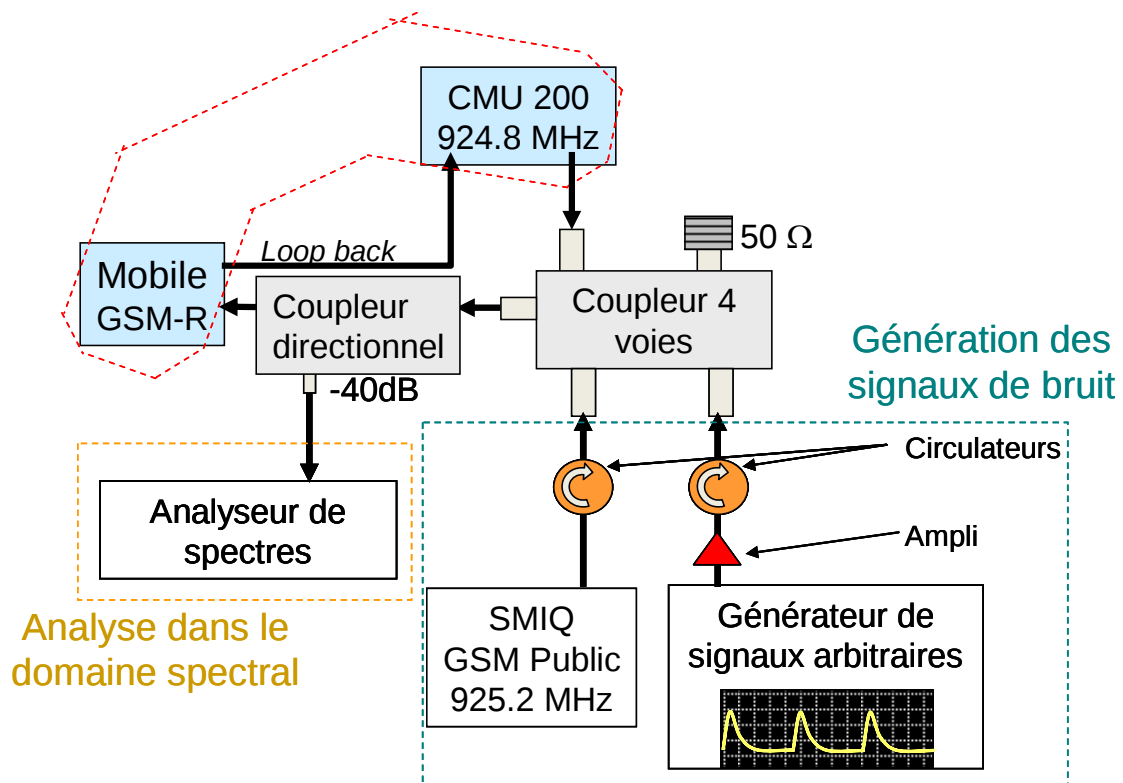


Fig. 4. 2. Configuration du banc de test de l'immunité du système GSM-R

Pour étudier l'immunité du système GSM-R face aux perturbations issues des interférences EM générées par les canaux adjacents utilisés par le système GSM public, un SMIQ (*Vector Signal Generator*, utilisé sur ce banc comme simulateur de réseau GSM public) a été utilisé afin de pouvoir générer un signal permettant de simuler la présence d'un réseau GSM public qui fonctionne sur un canal adjacent à la bande GSM-R.

D'un autre coté, pour étudier l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires, un générateur de signaux arbitraires a été employé pour générer les signaux transitoires de test. Un amplificateur de 27 dB a été inséré entre la sortie du générateur et l'entrée du banc, permettant d'amplifier la puissance des signaux transitoires injectés.

Afin de lier l'ensemble de ces systèmes, le choix s'est porté sur l'utilisation de coupleurs ainsi que des circulateurs permettant de protéger les générateurs des signaux de bruit (générateur de signaux arbitraires et SMIQ) des signaux émis par mobile. Le coupleur 4 voies sert à assembler le mobile, les générateurs de signaux et le simulateur de réseau (SMIQ).

Le mobile GSM-R a été configuré sur ce banc pour fonctionner en « Loop back », c'est-à-dire qu'il renvoie vers le CMU, via son port de sortie, exactement la même information qu'il a reçue sur la bande de fréquence du lien descendant.

Le coupleur directionnel permet de connecter un analyseur de spectre ou un oscilloscope au niveau de l'entrée du mobile afin d'observer la forme et les spectres des signaux envoyés sur le canal de communication du mobile.

Plus de détails et d'information concernant ce banc de test peuvent être retrouvés sur [IV-1]

L'objectif étant ici d'étudier l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires, le SMIQ ne sera pas utilisé lors de nos tests et sera remplacé par une charge de 50 Ω .

II. DISCUSSION SUR LES SIGNAUX TESTS A APPLIQUER POUR L'ETUDE DE L'IMMUNITE DU SYSTEME GSM-R

Une étude pertinente de l'immunité du système GSM-R face aux perturbations EM transitoires à l'aide du banc de test présenté sur la Fig. 4. 2. passe nécessairement par une définition préalable des signaux de test à utiliser.

Ces signaux doivent avoir une forme, des caractéristiques temporelles et d'amplitude semblables à ce que peut voir le système GSM-R sous des conditions normales d'opération d'un train en mouvement.

Ils devront également être envoyés avec des intervalles de temps représentatifs de ceux observés lors des campagnes de mesures.

Les caractéristiques temporelles de ces événements sont définies selon les résultats de l'étude des caractéristiques des événements transitoires observés à bord d'un train en mouvement présentée au chapitre 3 de ce manuscrit.

1. Modèle des perturbations transitoires reçues par les antennes GSM-R

Les signaux transitoires observés par une antenne GSM-R fixée au-dessus d'un train en mouvement peuvent être approchés par une double exponentielle, dont les caractéristiques temporelles et d'amplitude peuvent être définies pour se rapprocher des événements transitoires observés en pratique.

L'expression analytique générale de ces événements transitoires peut s'écrire sous la forme donnée par l'équation 4. 1.

$$V(t) = Ak \left(\exp\left(-\frac{t}{FT}\right) - \exp\left(-\frac{t}{RT}\right) \right) \gamma(t) \quad 4. 1.$$

$V(t)$ représente l'amplitude du signal transitoire en fonction du temps. A est l'amplitude crête de l'événement transitoire, RT est le temps de montée et FT est le temps de descente. K est une constante qui dépend de A , RT et FT . La causalité du signal transitoire est donnée par la fonction échelon γ .

L'avantage qu'offre l'utilisation de la forme double exponentielle pour la modélisation des événements transitoires est la simplicité d'utilisation, la facilité de contrôle des caractéristiques temporelles et la stabilité du niveau de bruit produit sur une large bande de fréquence.

En effet, en suivant le raisonnement donné par [IV-3], nous avons pu développer un algorithme permettant de calculer automatiquement $V(t)$ à partir des caractéristiques (A , RT , DT) de chaque événement transitoire qu'on souhaite générer.

A titre d'exemple, la Fig. 4. 3. donne la forme d'onde d'un événement transitoire formé par une double exponentielle dont le temps de montée est de 0.4 ns, la durée est de 5 ns et

l'amplitude crête est de 0.45 V. Les caractéristiques temporelles et d'amplitude de cet événement, correspondent aux valeurs les plus fréquemment observées lors des campagnes de mesure.

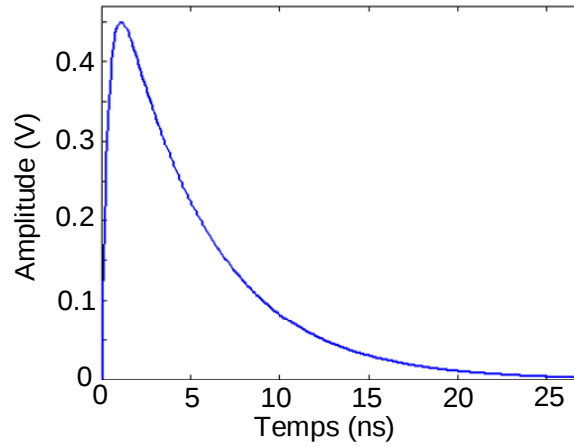


Fig. 4. 3. Forme d'onde d'un événement transitoire formé par une double exponentielle dont le temps de montée est de 0.4 ns, la durée est de 5 ns et l'amplitude crête est de 0.45 V

Ce type de signal, lorsque ses caractéristiques temporelles et d'amplitude suivent celles des événements transitoires observés à bord d'un train, couvre une très large bande de fréquence et génère des niveaux de bruit EM stables sur toute la bande de fonctionnement du système GSM-R. Ceci le rend intéressant pour l'étude de l'immunité du système GSM-R puisque le résultat sera indépendant du canal GSM-R choisi lors de l'essai.

Pour présenter le spectre du signal transitoire formé par une double exponentielle, l'équation 4. 2. donne l'expression analytique de la transformée de Fourier (TF) de l'équation 4. 1. qu'on note $V(f)$.

$$V(f) = TF[V(t)] = E_0 K \left(\frac{\beta - \alpha}{\alpha \beta - (2\pi f)^2 + j(2\pi f)(\alpha + \beta)} \right) \quad 4. 2.$$

Avec $\alpha = 1/FT$, $\beta = 1/TM$ et « j » l'opérateur complexe.

L'amplitude de $V(f)$ étant une densité spectrale exprimée en Volt/Hz. Afin de comparer cette formulation analytique avec les résultats présentés dans la suite de ce chapitre (obtenus par un analyseur de spectre configuré avec une bande de résolution de 120 kHz et données en dBm), nous avons choisi de présenter l'amplitude de $V(f)$ analytique en termes de puissance ramenée sur une charge 50 Ω , exprimée en dBm et calculée sur une bande de 120 kHz. Le filtre de l'analyseur étant très sélectif, l'amplitude mesurée par l'analyseur peut être approximée par le produit de l'amplitude de TF $[V(t)]$ et la largeur du filtre (120 kHz dans notre cas)

La Fig. 4. 4. donne l'amplitude du bruit transitoire présenté Fig. 4. 3. sur une bande de fréquence allant de 10 MHz à 1 GHz.

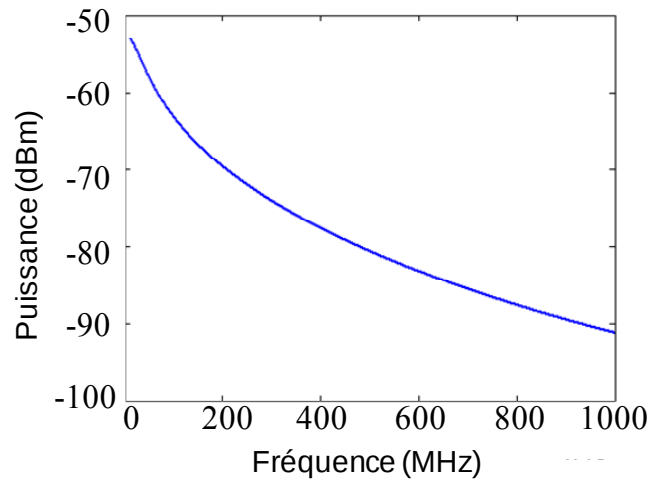


Fig. 4. 4. Amplitude spectrale ramenée par l'événement transitoire sur la bande 10 MHz – 1 GHz

Cette figure montre que l'énergie de l'événement transitoire se concentre principalement sur les basses fréquences de 10 à 250 MHz. En effet, au-delà de cette dernière fréquence, l'écart de puissance est supérieur à 20 dB par rapport à la puissance observée en début de bande et le niveau de puissance obtenu à 1 GHz est de l'ordre de -91 dBm.

Pour observer le niveau ramenée par ce type d'événement sur la bande de fonctionnement du système GSM-R, la Fig. 4. 5. présente le tracé de la Fig. 4. 4. sur la bande 875 MHz – 925 MHz.

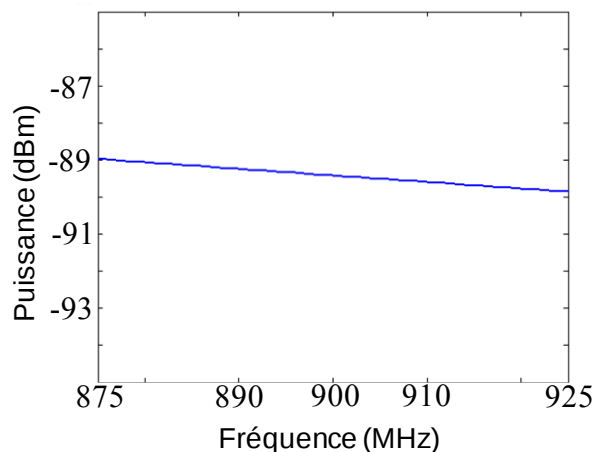


Fig. 4. 5. Amplitude spectrale ramenée par l'événement transitoire sur les bandes de fonctionnement du système GSM-R

Le niveau de couverture ramenée par le transitoire sur les bandes de fonctionnement du système GSM-R (up-link et down-link) est de l'ordre de -89 dBm et reste pratiquement

constant sur tous les canaux de communication du système GSM-R. Cette propriété est bien appropriée pour des tests d'immunité du système GSM-R. L'emploi de ce type de transitoire permet de réaliser des tests d'immunité indépendamment du canal de fréquence utilisé par le système GSM-R. Cependant, le niveau de couverture de ce type d'événement reste faible sur la bande de fonctionnement du système GSM-R. Pour effectuer les tests d'immunité du système GSM-R face aux événements transitoires, il faut que le niveau ramené par ces événements sur la bande du système GSM-R soit comparable aux niveaux ramenés par les transitoires observés à bord du train.

Par ailleurs, lorsqu'il s'agit d'utiliser ce type de forme d'onde dans un banc de test comportant des coupleurs, des amplificateurs et des circulateurs, des déformations importantes sur les signaux transitoires injectés à l'entrée du banc peuvent être constatées au niveau de l'entrée du mobile.

2. Déformation du modèle transitoire par le banc de test

Le banc de test de l'immunité du système GSM-R est constitué de plusieurs composants électroniques qui ont des bandes passantes limitées, et des fréquences de coupure de l'ordre de 1 GHz, proches de la bande de fonctionnement du système GSM-R. Ainsi, tout signal large bande, formé par une double exponentielle et émis par le générateur de signaux arbitraires, est partiellement filtré et modifié lorsqu'il traverse les circulateurs, les coupleurs et les amplificateurs qui le séparent de l'entrée du mobile GSM-R.

Pour illustrer l'influence des composants électroniques précités sur la forme d'onde et la couverture spectrale des événements transitoires formés par une double exponentielle, on a généré à l'aide du générateur de signaux arbitraires, la forme d'onde du signal transitoire présentée sur la Fig. 4. 3.

La Fig. 4. 6. donne la forme d'onde d'un signal mesuré à la sortie du générateur de signaux arbitraires avec un temps de montée de 0.4 ns et une durée de 5 ns.

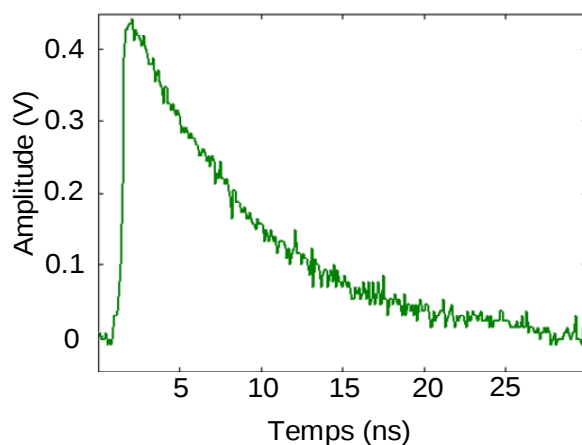


Fig. 4. 6. Forme d'onde mesurée à la sortie du générateur de signaux arbitraires d'un signal formé par une double exponentielle dont le temps de montée est de 0.4 ns, la durée est de 5 ns et l'amplitude crête est de 0.45 V

On précise que l'amplitude crête de 0.45 V est une limite imposée par le générateur de signaux arbitraires. La sortie du générateur a été connectée à l'entrée du banc de test de l'immunité du système GSM-R comme le montre la Fig. 4. 7.

Pour les besoins de cette expérience, le CMU et le SMIQ ont été remplacés par des charges de 50 Ω .

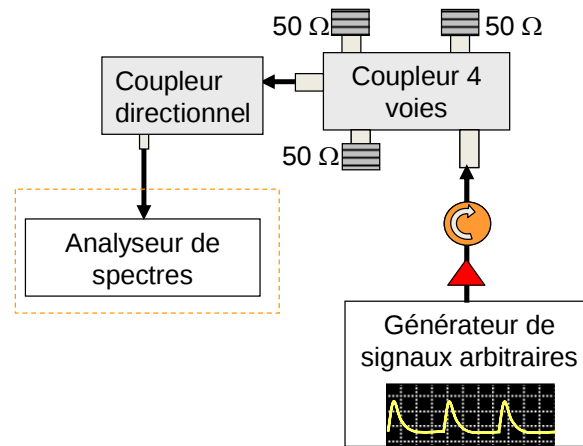


Fig. 4. 7. Configuration du banc de test pour l'étude de l'impact des temps de montée sur le bruit EM généré à l'entrée du mobile GSM-R

L'objectif principal de cette expérience est de voir l'influence du banc de test sur les niveaux de couverture ramenés par les événements transitoires, injectés par le générateur de signaux arbitraires, sur l'entrée du mobile. Nous avons donc choisi de comparer le spectre du signal transitoire donné par le générateur de signaux arbitraires et l'amplitude spectrale du bruit ramené sur l'entrée du mobile par cet événement transitoire.

Les courbes verte et bleue de la Fig. 4. 8. donnent respectivement l'amplitude spectrale de l'événement transitoire injecté à l'entrée du banc de test (avant amplification) et l'amplitude spectrale mesurée à l'entrée du mobile.

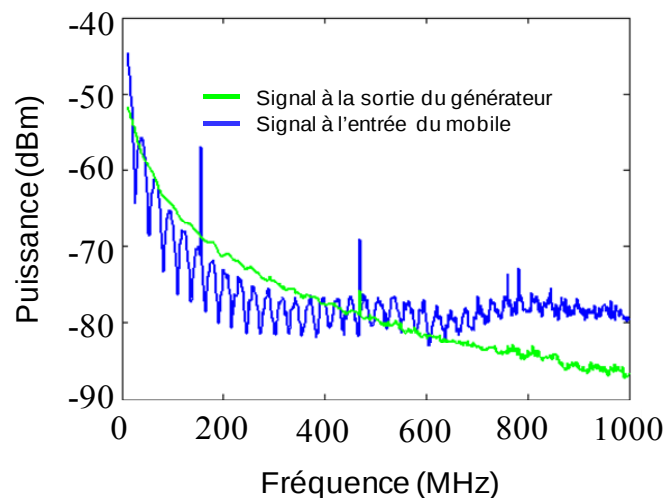


Fig. 4. 8. Amplitude spectrale mesurée à la sortie du générateur et à l'entrée du mobile sur la bande 10 MHz – 1000 MHz

Les mesures fréquentielles du bruit à l'entrée du mobile et au niveau du générateur ont été réalisées à l'aide d'un analyseur de spectre configuré pour faire des mesures sur la bande 10 MHz – 1 GHz avec une bande de résolution de 120 kHz. Cette bande a été fixée pour être la plus proche de la largeur des canaux du système GSM-R (de l'ordre de 200 kHz), et offre ainsi la possibilité de mesurer les niveaux que peut voir le mobile GSM-R sur ces canaux de communication lorsqu'il est soumis aux événements transitoires.

Sachant que la durée d'un événement transitoire est très courte par rapport au temps de balayage de l'analyseur de spectre, nous avons configuré le générateur afin qu'il génère le signal transitoire à une fréquence de répétition de 5 kHz (fréquence choisie après plusieurs essais) et nous avons mesuré le bruit électromagnétique à l'aide de l'analyseur de spectre en utilisant la fonction « Maxhold ».

Les spectres présentés ici ont été obtenus par l'analyseur après 2 minutes de temps de mesure. Au-delà de ce temps de mesure, les spectres observés restent stables.

Cette figure montre que l'amplitude du spectre du signal donné par le générateur de signaux arbitraires (courbe verte de la Fig. 4. 8.) est comparable à celui obtenu par la TF analytique du signal double exponentielle (Fig. 4. 4.) sur toute la bande de fréquence observée. En revanche, le spectre mesuré à l'entrée du mobile (courbe bleue de la Fig. 4. 8) est déformé et varie sensiblement avec une période fréquentielle de l'ordre de 30 MHz sur toute la bande observée. Nous pensons que les variations du signal observées à l'entrée du mobile sont principalement dues aux phénomènes introduits par les composants électroniques, utilisés sur le banc d'essai, qui n'ont pas été nécessairement conçus pour fonctionner convenablement avec des signaux large bande.

Pour comprendre les raisons de la déformation du signal, on superpose sur la Fig. 4. 9. la forme d'onde du signal mesuré à l'entrée du mobile en fonction du temps (courbe rouge) et le signal transitoire de la Fig. 4. 6. (courbe verte). La courbe rouge a été obtenue à l'aide d'un oscilloscope numérique connecté à la place du mobile, lorsque le générateur de signaux arbitraires injecte le signal transitoire présenté sur la Fig. 4. 6.

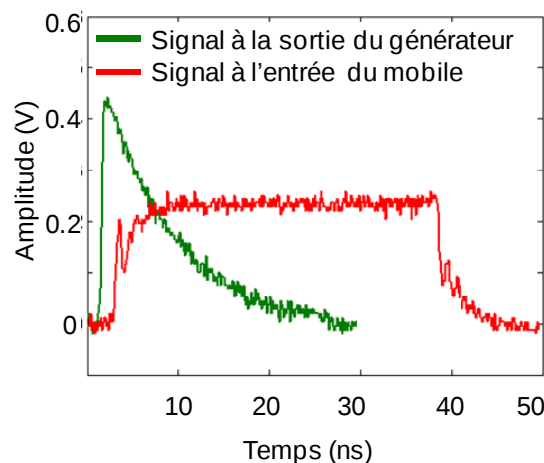


Fig. 4. 9. Comparaison entre la forme d'onde mesurée à l'entrée du mobile (ligne rouge) et la forme d'onde générée par le générateur de signaux arbitraires (ligne verte)

La courbe rouge de la Fig. 4. 9. présente la forme d'onde d'une fonction porte d'amplitude de 0.25 V et une durée de l'ordre de 35 ns. On note donc que la combinaison de l'ensemble des éléments utilisés sur le banc de test d'immunité joue le rôle d'un filtre qui a étalé la durée de l'événement transitoire injecté en entrée et a sensiblement fait baisser son amplitude.

Par ailleurs, le signal mesuré à l'entrée du mobile peut être modélisé par la fonction porte donnée par l'équation 4. 3.

$$\forall t \in \mathbb{R}, \begin{cases} x(t) = A, t \in \left[-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \right] \\ x(t) = 0, t \notin \left[-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2} \right] \end{cases} \quad 4. 3.$$

A est l'amplitude maximale de la porte et τ la durée de la porte.

Dans le domaine fréquentiel, cette équation peut s'écrire sous la forme d'un sinus cardinal comme donné par l'équation 4. 4.

$$X(f) = \tau.A \operatorname{sinc}(\pi.f.\tau) \quad 4. 4.$$

La fonction sinc ($\pi.\tau.f$) admet un minimum tous les $\frac{k}{\tau}$ Hz, avec $k \in \mathbb{N}$, soit dans notre cas, une fréquence de l'ordre de ($k. 28,5$ MHz). Ceci explique donc les déformations observées sur le spectre du signal mesuré à l'entrée du mobile.

Les importantes variations de bruit électromagnétique observées à l'entrée du mobile lors de ce test, montre que l'utilisation de signaux de test de type double exponentielle n'est pas adaptée à l'étude de l'immunité du système GSM-R à l'aide du banc de test présenté sur la Fig. 4. 2. En effet, on souhaite mener des essais avec des signaux qui permettent de générer des amplitudes spectrales constantes sur la bande de fonctionnement du système GSM-R. Ceci permettra de réaliser des tests d'immunité reproductibles, quelque soit le canal de communication utilisé par le système GSM-R. Or, on remarque que le signal mesuré à l'entrée du mobile n'a pas une variation progressive et les niveaux qui sont générés sur la bande de fréquence explorée sont difficilement maîtrisables.

Comme cela a été dit précédemment, à l'entrée du banc de test on a installé un amplificateur de 27 dB. Or, la comparaison entre les niveaux de puissance injectés par le générateur sur l'entrée du banc de test et les niveaux mesurés à l'entrée du mobile, montrent un gain maximal de 7 dB et la puissance maximale qui atteint l'entrée du mobile par ce type de transitoires ne dépasse pas -75 dBm sur la bande de fréquence du système GSM-R. Ceci prouve que les composants électroniques utilisés sur ce banc ne peuvent pas fonctionner convenablement avec des signaux transitoires formés par une double exponentielle.

Des tests supplémentaires réalisés à l'aide de signaux transitoires générés à l'entrée du banc avec des durées (DT) variables, ont montré que l'étalement temporel introduit par le banc de test ne suit pas linéairement la variation des durées de transitoires. Nous avons également

remarqué que l'amplitude crête de l'événement transitoire mesuré à l'entrée du mobile ne suit pas linéairement la variation de l'amplitude crête du signal injecté par le générateur de signaux arbitraires à l'entrée du banc de test. Ainsi, il sera très difficile, à l'aide du banc de test dont on dispose au laboratoire d'étudier l'influence des caractéristiques temporelles et d'amplitude des événements transitoires sur l'immunité du système GSM-R.

3. Définition du signal test

Face aux problèmes rencontrés avec l'emploi des signaux transitoires larges bandes sur le banc de test, on a choisi de faire les tests d'immunité en employant des signaux de test à bande plus restreinte mais garantissant des niveaux de bruit électromagnétique suffisamment élevés (pour se rapprocher des niveaux de bruit EM observés à bord d'un train) et constants sur la bande de fréquence du lien descendant du système GSM-R. Ainsi, la perturbation n'agira que sur le signal de communication envoyé par le CMU 200 et reçu par le mobile GSM-R et aura peu d'effet sur la réponse du mobile qui emploie la bande montante. Il faut aussi garder à l'esprit que comme à bord du train, sur le banc de test utilisé le mobile répond toujours au CMU 200 à travers le lien montant située entre 876 MHz et 880 MHz. En réalité les transmissions montantes partent avec de fortes puissances et ne sont pas généralement perturbées par les phénomènes transitoires qui apparaissent entre la caténaire et le pantographe. Ainsi, le signal test qui doit être utilisé sur le banc ne doit pas couvrir les bandes de fréquence du lien descendant pour avoir des conditions de test représentatives de ce qui se passe réellement à bord du train.

Afin d'adapter les signaux transitoires au banc de test, il a fallu trouver un procédé permettant de centrer l'énergie des événements transitoires sur la bande du lien descendant du système GSM-R et de limiter la bande passante des signaux envoyés à l'entrée du mobile sur une bande de fréquence étroite, comprise entre 921 MHz – 925 MHz. Ainsi, on pourra limiter l'influence des composants électroniques utilisés par le banc de test, sur les signaux transitoires injectés par le générateur de signaux arbitraires.

Pour aboutir à ce type de signaux, plusieurs tests et essais ont été réalisés au sein du laboratoire, notamment des solutions basées sur l'application de filtres numériques sur les signaux transitoires double exponentielle avant de les générer à l'entrée du banc.

Les tests ont été réalisés à l'aide de filtres passe bande et de filtres passe haut, mais les résultats n'ont pas été satisfaisants. En effet, pour utiliser ces filtres, il a fallu fixer leur fréquence de coupure à une valeur proche de 1 GHz (pour limiter la bande passante des signaux transitoires injectés à 925 MHz). Cette fréquence étant proche de la fréquence de coupure de l'ensemble des composants électronique utilisés sur le banc de test, les signaux injectés à l'entrée du banc se trouvent complètement déformés et inexploitable pour les tests d'immunité du système GSM-R à l'aide de ce banc.

Au final, ces tests ont permis de montrer que la modulation des événements transitoires (dont la forme suit une double exponentielle) par une sinusoïde de fréquence centrée sur la bande 921 MHz – 925 MHz, soit 923 MHz, est le meilleur choix pour ce type de test d'immunité. Ce

signal permet de générer des niveaux de bruit de forte amplitude (proche de celles générées par les transitoires lors des campagnes de mesures) et permet de concentrer l'énergie du transitoire sur la bande de fréquence du lien descendant du système GSM-R.

L'équation 4. 5. donne l'expression analytique de ce signal qu'on note $V_m(t)$.

$$V_m(t) = V(t)\sin(2\pi f_0 t) \quad 4. 5.$$

Avec $f_0 = 923$ MHz et $V(t)$ le signal en double exponentielle donné par l'équation 4. 1.

Pour illustrer un exemple de ce type de signal, on présente sur la Fig. 4. 10. (a) la forme d'onde d'une double exponentielle qui a une amplitude crête de 0.45 V, un temps de montée de 0.4 ns et une durée de 5 ns modulée par une sinusoïde de 923 MHz.

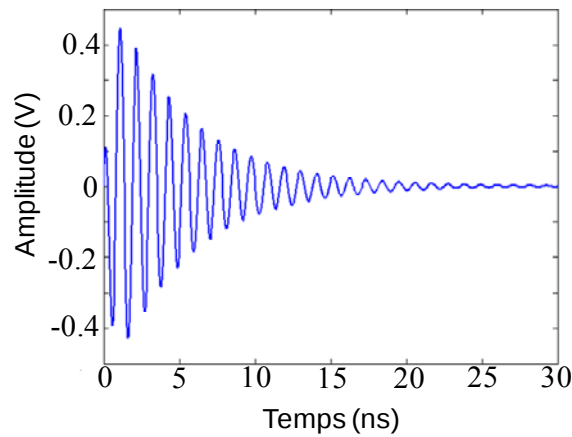


Fig. 4. 10. (a) Événement transitoire formé par une double exponentielle modulée à 923 MHz

Le spectre de ce signal (Fig. 4. 10. (b)) a été obtenu à partir du module de la TF analytique de $V_m(t)$ qui s'écrit :

$$V_m(f) = TF[V_m(t)] = V(f) * TF(\sin(2\pi f_0 t)) \quad 4.6.$$

Soit

$$V_m(f) = \frac{j}{2}(V(f + f_0) - V(f - f_0))$$

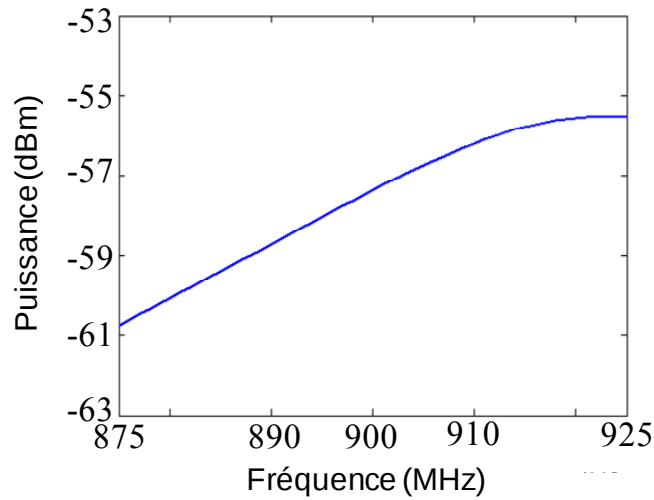


Fig. 4. 10. (b) Spectre de l'événement transitoire formé par une double exponentielle modulée à 923 MHz

L'amplitude de $V_m(f)$ étant une densité spectrale exprimée en Volt/Hz. Afin de comparer cette formulation analytique avec les résultats obtenus précédemment, nous avons choisi de présenter l'amplitude de $V(f)$ analytique en termes de puissance ramenée sur une charge 50Ω , exprimée en dBm et calculée sur une bande de 120 kHz.

Analytiquement, on observe que ce signal a l'avantage de générer une amplitude stable de (-56 dBm), très supérieure à celle donnée par le signal double exponentielle simple qui est de -89 dBm sur la bande qui nous intéresse qui est celle du lien descendant du système GSM-R (921 MHz – 925 MHz).

III. ANALYSE DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES RESULTATS DE TEST D'IMMUNITE

Les paramètres les plus influents sur les résultats des tests d'immunité sont le niveau de bruit EM généré sur la bande GSM-R et la récurrence des événements transitoires.

1. Récurrence des phénomènes transitoires

La récurrence des événements transitoires est un facteur très important pour l'étude de l'immunité du système GSM-R. En effet, il est intuitif de penser que plus la récurrence des événements transitoires est importante et plus l'intégrité du signal utile du système GSM-R peut être affectée.

L'objectif de cette partie est de voir en pratique l'influence de la récurrence des phénomènes transitoires sur les résultats d'immunité du système GSM-R.

Pour ce faire, nous avons utilisé dans un premier temps le banc de test d'immunité configuré comme présenté sur la Fig. 4. 11.

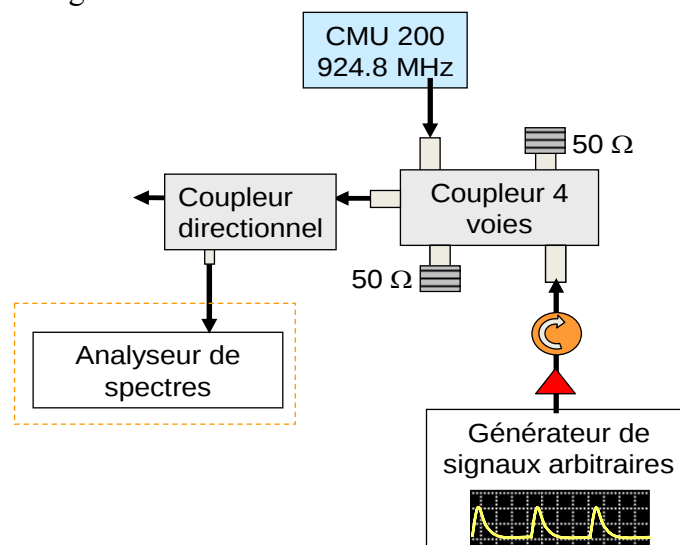


Fig. 4. 11. Configuration du banc de test d'immunité pour l'étude de l'influence de la récurrence des phénomènes transitoires

Nous avons chargé la mémoire du générateur de signaux arbitraires par la forme d'onde qui modélise les événements transitoires (une double exponentielle avec $TM = 0.4$ ns, $DT = 5$ ns et $A = 0.45$ V modulée par une sinusoïde à 923 MHz). Le générateur a été connecté à l'entrée du banc de test et a été programmé dans un premier temps pour générer un signal transitoire avec un intervalle de récurrence de 200 μ s.

La Fig. 4. 12. illustre un scénario de bruit, composé de trois événements transitoires qui apparaissent avec un intervalle de récurrence de 200 μ s.

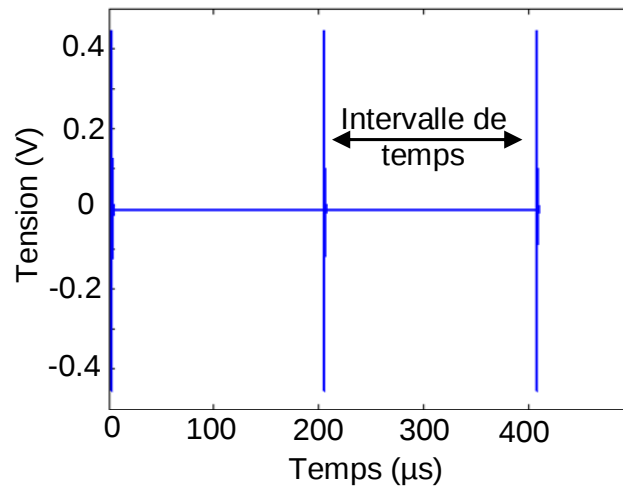


Fig. 4. 12. Scénario de bruit composé de trois événements transitoires qui apparaissent avec un intervalle de récurrence de 200 µs.

Parallèlement, grâce à un analyseur de spectre placé en amont du mobile, la puissance du signal GSM-R a pu être ajustée. L'analyseur de spectre a été configuré en « Maxhold » afin de mesurer le niveau de bruit électromagnétique ramené par le signal transitoire sur l'entrée du mobile puis la puissance du signal GSM-R a été ajustée pour avoir un rapport signal à bruit (SNR) égal à 1. Le SNR est défini par le rapport entre le niveau de signal utile et le niveau de bruit EM.

Puis, le mobile a été connecté au banc d'essai tel que le montre la Fig. 4. 2. et il a été configuré pour fonctionner en « Loop back », c'est-à-dire qu'il renvoie sur sa sortie (vers le CMU) les trames telles qu'il les a réceptionnées.

Pour observer l'influence de l'intervalle de temps sur l'immunité du système GSM-R, nous avons choisi d'étudier la variation du taux d'erreur binaire BER (Bit Error Rate (équation 4.4.)) introduit par les événements transitoires en fonction de leur récurrence. Le choix a été fait pour calculer le BER sur 1000 trames de voix.

$$\text{BER (\%)} = (\text{Nombre de bits erronés} / \text{Nombre de bits transmis}) * 100 \quad 4. 4.$$

L'avantage d'utiliser le BER comme indicateur de qualité de communication réside dans le fait que ce paramètre est facilement comparable à des critères de qualité fixés par les opérateurs ferroviaires. En effet, dans le domaine ferroviaire, les opérateurs acceptent généralement un BER inférieur à 1.13 % [IV-4]. Lorsque le BER est supérieur à cette valeur, la continuité du service GSM-R n'est pas nécessairement garantie.

Ce BER est calculé à l'aide du CMU, en comparant les bits qu'il envoie vers le mobile et les bits qu'il reçoit. Nous avons mesuré le BER introduit sur les communications GSM-R par les événements transitoires pour différentes valeurs d'intervalle de temps de récurrence.

La Fig. 4. 13. donne le BER mesuré par le CMU en fonction de l'intervalle de temps entre deux transitoires successifs.

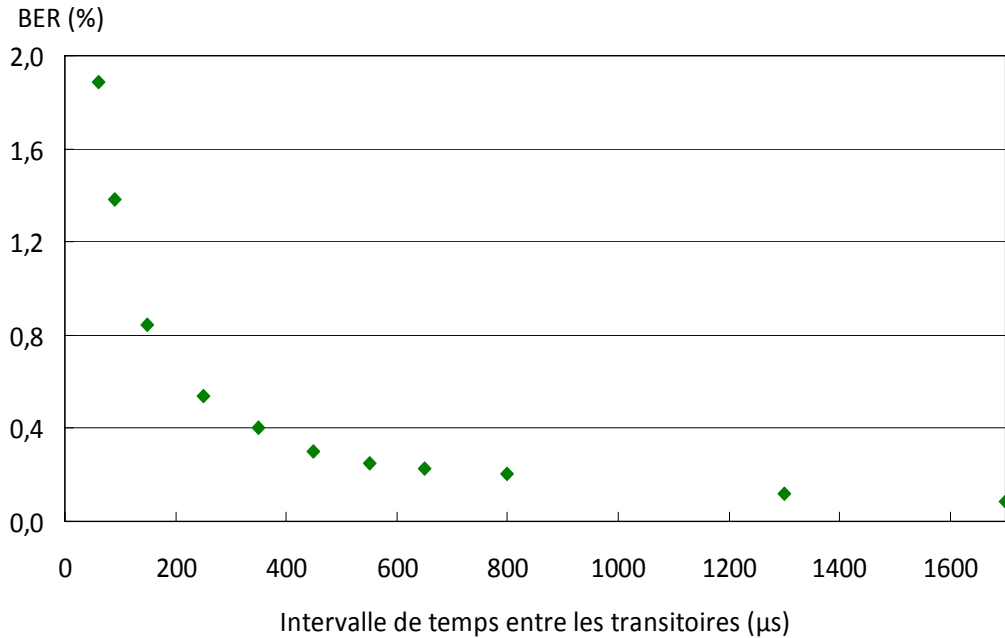


Fig. 4. 13. Evolution du BER en fonction de l'intervalle de temps entre les transitoires

Cette figure montre que l'intervalle de récurrence a un impact très important sur l'immunité du système GSM-R exprimée en termes de taux d'erreur binaire. On observe que plus le taux de récurrence des événements transitoires est important, plus la qualité de transmission du système GSM-R est dégradée.

Les variations du BER en fonction de l'intervalle de temps sont très importantes, à titre d'exemple, on remarque que lorsque l'intervalle de temps est de l'ordre de 60 μs, le BER est de l'ordre de 2 %, cette valeur baisse à 0.1 % lorsque l'intervalle de temps est de l'ordre de 1.7 ms.

Sachant que pour assurer la continuité du service offert par le système GSM-R, les opérateurs ferroviaires recommandent un BER inférieur à 1.13 %, il est clair que la réduction de l'intervalle de temps (IT) des événements transitoires peut mettre à défaut le fonctionnement du système GSM-R. Ceci montre l'importance de ce paramètre pour l'étude de l'immunité du système GSM-R.

Sur les résultats, obtenus à partir des campagnes de mesure, on a pu constater que les intervalles de temps peuvent aussi bien descendre à 3 μs lorsque la vitesse du train est élevée et peuvent dépasser 400 μs lorsque la vitesse est faible.

Or, à la lecture des résultats donnés par la Fig. 4.13, on constate qu'il est parfaitement inutile d'appliquer des scénarios de bruits transitoires représentatifs du pire cas (qui consisterait à appliquer un intervalle de temps de 3μs), puisque la qualité de service du système GSM-R sera très affectée sous ces conditions de test. En effet, les résultats de la Fig. 4.13 montrent

qu'il suffit que l'intervalle de temps soit de l'ordre de 100 μ s, pour que le BER augmente à 1.4 % et que la continuité du service GSM-R ne soit pas nécessairement assurée.

Pour réaliser des tests d'immunité du système GSM-R sous des conditions proches de la réalité des conditions d'opération des trains et mener des essais pertinents, il faudrait plutôt étudier l'immunité du système GSM-R face à des signaux transitoires qui apparaissent avec un intervalle de temps qui suit une la loi statistique obtenue à partir des mesures réalisées à bord du train, en l'occurrence la loi de Weibull dont la fonction densité de probabilité et les paramètres (a et b) correspondants sont donnés par l'équation 3. 4. décrite dans la partie IV.5. du chapitre 3.

Pour réaliser un tel scénario, nous avons développé une routine sous Matlab permettant de générer un scénario d'événements transitoires qui apparaissent avec un intervalle de temps qui suit la loi de Weibull décrite précédemment.

La Fig. 4. 14. illustre la forme d'onde d'un scénario de test d'immunité généré à l'aide de ce programme et composé d'un ensemble d'événements transitoires qui apparaissent successivement avec un intervalle de temps qui suit la loi de Weibull. Bien que ceci ne soit pas visible sur la figure, chaque événement transitoire est une double exponentielle modulée par une sinusoïde à 923 MHz.

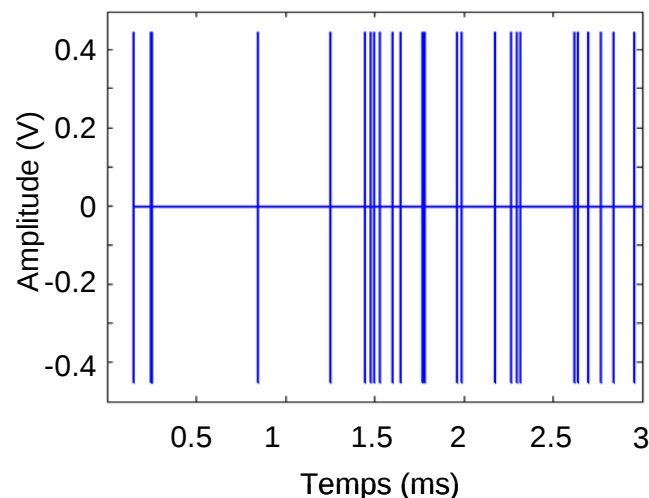


Fig. 4. 14. Forme d'onde d'un signal test composé d'événements transitoires qui apparaissent avec un intervalle de temps qui suit la loi de Weibull

Ce scénario comporte 30 événements transitoires couvrant une durée totale de l'ordre de 3 ms. L'intervalle de temps qui sépare deux événements transitoires successifs suit la loi de Weibull obtenue en pratique dans le chapitre précédent.

On rappelle que cette loi de Weibull a été établie à partir de l'analyse de fenêtres temporelles de 400 μ s et par conséquent les intervalles supérieurs à 400 μ s ne sont pas pris en compte.

Ce scénario d'événements transitoires est un exemple d'une séquence de signaux test représentative de ce que peut voir le système GSM-R à bord d'un train en mouvement sur une

durée de l'ordre de 3 ms. Pour réaliser des tests d'immunité du système GSM-R réalistes, il faut générer des signaux arbitraires avec des durées comparables à la durée d'un trajet, soit un très long signal temporel qui couvre une durée de l'ordre d'une heure par exemple. Dans la partie IV-1, on donnera les principales difficultés rencontrées au sein du laboratoire pour l'utilisation de ce type de séquences lors des tests d'immunité du système GSM-R qu'on veut mener.

Par ailleurs, des travaux complémentaires [IV-5] ont permis de mettre en évidence que le BER peut être estimé à partir de la fréquence de répétition des transitoires.

En effet, des travaux réalisés au sein du laboratoire ont montré que sous certaines hypothèses, notamment lorsque le SNR = 0 dB, le BER peut être prédit à l'aide de l'équation 4. 3.

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \frac{Rr}{Rs} \quad 4. 3.$$

Où Rr est le taux de répétition des transitoires et Rs le débit des transmissions GSM-R, généralement de l'ordre de 270 kbits/s.

En d'autres termes, ceci suppose que dès lors qu'un bruit EM transitoire apparaît, lorsque le rapport signal à bruit est de 1, la chance de bonne interprétation du bit est de 50 %.

2. Niveau de bruit EM généré sur la bande GSM-R

Comme cela a été dit précédemment, le comportement non linéaire des systèmes électroniques utilisés sur le banc de test d'immunité ne permet pas d'étudier l'influence des caractéristiques temporelles et d'amplitude des événements transitoires sur l'immunité du système GSM-R. A l'aide de ce banc, l'étude de l'immunité du système GSM-R sera donc réalisée en utilisant des événements transitoires dont la forme d'onde et les caractéristiques temporelles et d'amplitude sont figées.

Le choix a été fait d'utiliser un événement transitoire formé par une double exponentielle modulée par un signal sinusoïdal de 923 MHz. Les caractéristiques temporelles et d'amplitude de la double exponentielle sont telles que l'amplitude crête est de 0.45 V, le temps de montée de 0.4 ns et la durée de 5 ns.

L'utilisation de ce type de signaux (forme et caractéristiques temporelles et d'amplitude figées) implique un niveau de bruit EM constant ramené sur la bande de fonctionnement du système GSM-R, ce qui ne représente pas des conditions d'opération réelles rencontrées au sein de l'environnement ferroviaire.

Néanmoins, les courbes théoriques de la Fig. 4. 15. montrent que la variation des caractéristiques temporelles et d'amplitude d'un événement transitoire peuvent principalement jouer sur le niveau de bruit EM ramené par cet événement sur la bande de fonctionnement du système GSM-R.

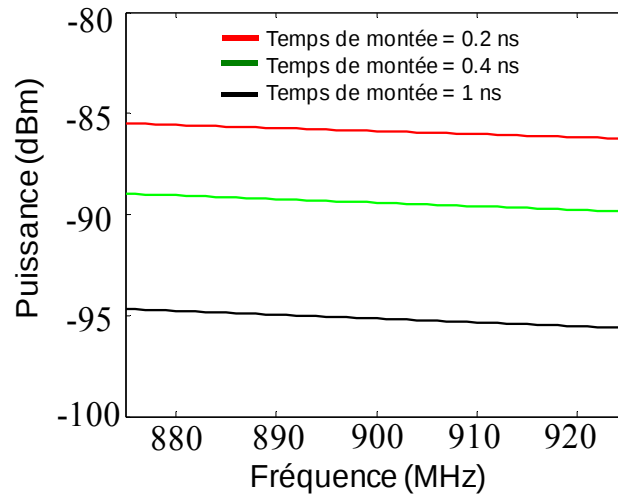


Fig. 4. 15. Puissance ramenée par des événements transitoires ayant des DT et des A constantes et un TM = 0.2 ns (ligne rouge), TM = 0.4 ns (ligne verte) et TM = 1 ns (ligne noire)

A titre d'illustration, la Fig. 4. 15. donne le niveau de bruit (obtenu à partir de l'amplitude de $TF[V(t)]$ donnée par l'équation 4. 6. et exprimé en terme de puissance consommée par une charge de 50Ω en dBm sur une bande de 120 kHz) ramené par trois événements transitoires ayant les caractéristiques suivantes :

- Une durée temporelle constante de 5 ns,
- Une amplitude crête constante de 0.45 V,
- Un temps de montée variable de 0.2 ns (ligne rouge), 0.4 ns (ligne verte) et 1 ns (ligne noire).

Ce constat est vérifié aussi lorsqu'on fait varier les autres paramètres temporels et d'amplitude des événements transitoires.

Ainsi, si on ne peut pas contrôler convenablement les caractéristiques temporelles des événements transitoires, on peut en revanche contrôler le niveau de bruit EM ramené sur la bande de fonctionnement du système GSM-R, et par conséquent le SNR.

Pour montrer l'importance de ce rapport sur l'immunité du système GSM-R, nous avons refait le test présenté dans la partie III. 1. mais cette fois, on a chargé la mémoire du générateur de signaux arbitraires par la forme d'onde d'un signal réel mesuré à bord du train avec une antenne GSM-R. Ce signal, dont la forme d'onde est donnée par la Fig. 4. 16, a été choisi car il possède des caractéristiques temporelles très proches du modèle des transitoires retenu. Le niveau du signal utile a été fixé de sorte à avoir un SNR = 0 dB. La mesure du BER a été réalisée, comme précédemment, pour différentes valeurs d'intervalles de temps.

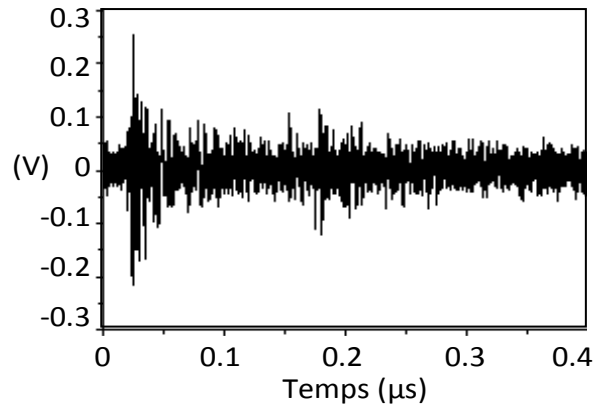


Fig. 4. 16. Forme d'onde d'un signal transitoire mesuré avec un temps de montée de 0.4 ns, une durée de 5 ns et une amplitude crête de l'ordre de 0.3 V

Sur la Fig. 4. 17. on présente par les points rouges le BER mesuré en fonction de l'intervalle de temps entre deux transitoires successifs. Sur ce graphe, on superpose les valeurs de BER (points en vert) obtenues avec un SNR = 0 dB et à l'aide du scénario de transitoire tel que celui présenté sur la Fig. 4. 12..

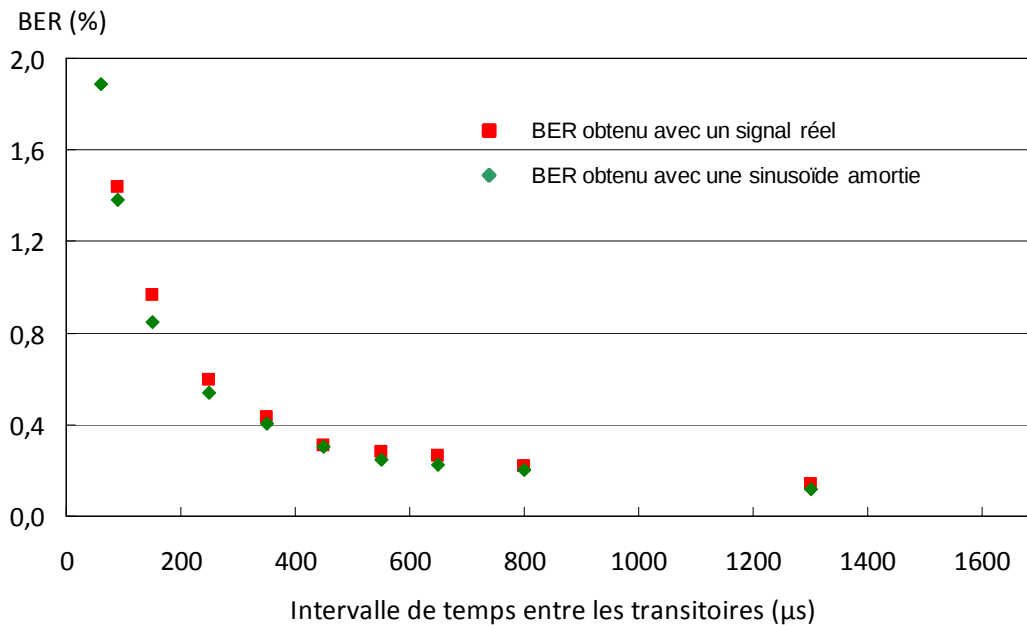


Fig. 4. 17. Evolution du BER en fonction de l'intervalle de temps qui sépare deux transitoires de forme d'onde réelle (points rouge) et une sinusoïde amortie (points verts) générant un SNR = 0 dB sur la bande GSM-R

La Fig. 4. 17. montre une concordance quasi-parfaite entre les résultats obtenus avec les deux signaux. A SNR constant, la forme d'onde n'a pas d'impact sur la qualité des communications GSM-R en termes de BER. Ceci confirme aussi que le modèle de transitoire (double

exponentielle modulée par une sinusoïde) qu'on a choisi est adapté à l'étude de l'immunité du système GSM-R face aux événements transitoires sur ce banc de test et qu'il s'agit désormais de définir le SNR à appliquer.

Pour mieux comprendre l'impact de ce paramètre (SNR) sur les capacités du système GSM-R à tolérer les événements transitoires, nous avons mené plusieurs essais en faisant varier ce rapport.

L'étude a été réalisée à l'aide du banc de test d'immunité configuré comme présenté sur la Fig. 4. 11.

Le modèle des signaux transitoires a été utilisé sur ces mesures et nous avons fixé le SNR (en ajustant le niveau du signal utile émis par le CMU) à 10 dB, 0 dB puis -10 dB.

Comme pour les tests d'immunité précédents, pour chaque valeur de SNR, on a mesuré le BER en fonction de l'intervalle de temps qui sépare deux événements transitoires consécutifs.

Les points bleus, magenta et verts de la Fig. 4. 18. donnent une correspondance entre l'intervalle de temps qui sépare deux événements transitoires successifs et le BER mesuré respectivement avec un SNR de 10 dB, 0 dB et - 10 dB.

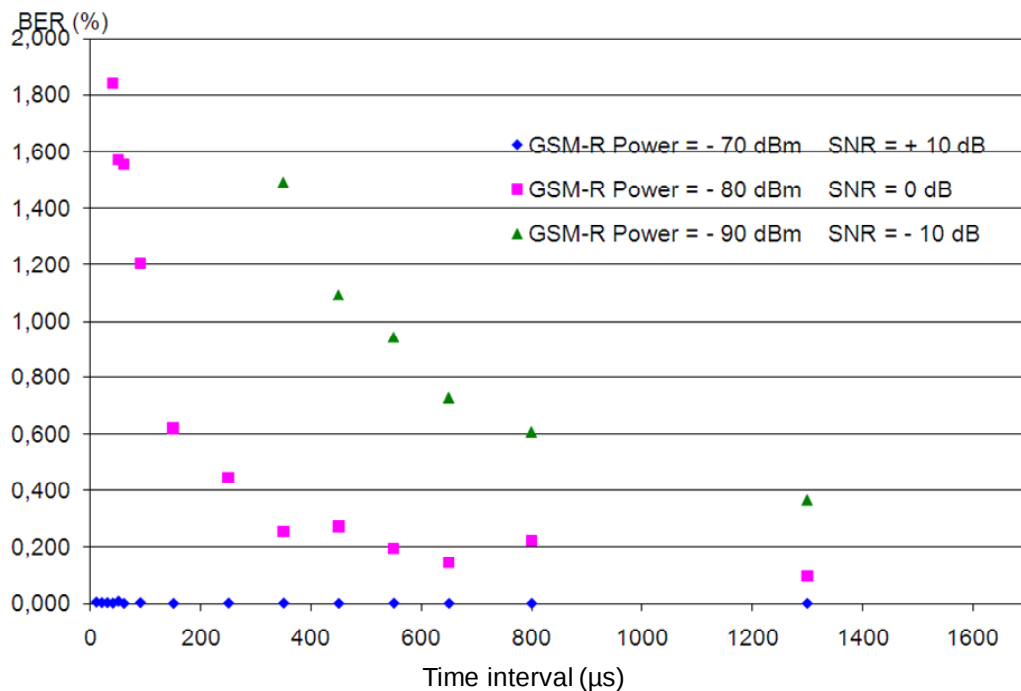


Fig. 4. 18. Evolution du BER en fonction de l'intervalle de temps qui sépare deux transitoires successifs pour différentes valeurs du SNR

Cette figure montre que pour un intervalle de temps constant entre les événements transitoires, on remarque que le SNR joue considérablement sur la valeur du BER.

Par exemple, pour un intervalle de temps de l'ordre de 650 μs, pour un SNR = - 10 dB le BER mesuré est de l'ordre de 0.6 %. Lorsque le SNR augmente de 10 dB, la valeur du BER baisse

à 0.15 %. Par ailleurs, lorsque le SNR atteint 10 dB, le système GSM-R ne voit plus la présence des événements transitoires et quelque soit l'intervalle de temps, le BER reste constant à 0 %.

Ainsi, ceci montre que la qualité des transmissions GSM-R au sein de l'environnement ferroviaire dépendra non seulement de la récurrence des perturbations transitoires mais également du rapport entre le signal utile et le niveau de bruit. Ces observations doivent donc être prises en compte pour fixer les conditions de test d'immunité.

IV. VARIATIONS DES PARAMETRES LES PLUS INFLUENTS SUR LES TESTS D'IMMUNITE POUR ETRE REPRESENTATIF DES CONDITIONS REELLES

Pour réaliser des tests d'immunité du système GSM-R à l'aide du banc de test, il faudrait que les paramètres les plus influents soient ajustés de sorte à reproduire au sein du laboratoire les conditions d'opération réelles observées par le mobile GSM-R. Il faudrait donc générer au niveau de l'entrée du mobile GSM-R des conditions semblables à ce qu'il peut observer à bord d'un train en mouvement. Cette partie propose certaines solutions pour respecter les variations observées sur les intervalles de temps entre les perturbations transitoires successives et sur le SNR.

1. Variations des intervalles de temps entre les perturbations EM transitoires

La récurrence des événements transitoires a un impact capital sur le taux d'erreur binaire des transmissions GSM-R dès lors que le rapport signal à bruit est inférieur à 0 dB. Les mesures et études réalisées précédemment ont montré que IT est très variable et peut dépendre de différents facteurs tels que la vitesse du train, l'état de la ligne ou du matériel roulant.

A titre d'exemple, l'étude réalisée au chapitre 3 sur les intervalles de temps qui séparent deux événements transitoires consécutifs, a montré que, les intervalles de temps moyens, observés à l'intérieur de fenêtres temporelles de 400 μ s, sont de l'ordre de 10 μ s.

Par contre, cette étude a également montré que sur un temps de mesure déterminé, (équivalent à un trajet par exemple) on observe que majoritairement les intervalles de temps sont supérieurs à 400 μ s. La plage de variation des intervalles de temps est donc très étalée.

Pour cela il n'existe pas de valeur typique de récurrence pouvant être appliquée lors des tests d'immunité si l'on veut reproduire des conditions représentatives de la réalité de l'environnement ferroviaire.

Il serait donc important de réaliser les tests d'immunité du système GSM-R face à des événements transitoires qui apparaissent avec des intervalles de temps variables qui suivent des variations semblables à celles rencontrées à bord du train.

Comme cela a été présenté dans la partie III.1 de ce chapitre, il faudrait réaliser des tests d'immunité à l'aide de scénarios de bruits transitoires qui apparaissent avec un intervalle de temps variable, suivant la loi de Weibull. Ainsi, on pourrait mener des essais sur une durée suffisamment longue afin de déterminer si les baisses de qualité de service sont fréquentes et si elles s'étendent sur des durées critiques pour la sécurité des réseaux ferroviaires.

Pour réaliser un test d'immunité du système GSM-R face à des scénarios de ce type, il faut charger la mémoire du générateur de signaux arbitraires par une séquence dont la durée est proche de la durée d'un trajet ferroviaire. Malheureusement, la profondeur de mémoire du générateur de signaux arbitraires est très limitée, et la durée temporelle maximale du signal test qu'il peut mémoriser ne peut pas dépasser 2 ms, avec une fréquence d'échantillonnage de

10 GHz. Il faut donc employer un dispositif externe au générateur pour contrôler les intervalles de temps si on souhaite étudier l'effet des perturbations EM sur des durées représentatives des trajets ferroviaires.

Dans ce cas, la mémoire du générateur de signaux arbitraires est simplement chargée par le modèle d'un événement transitoire (forme d'onde double exponentielle avec les caractéristiques temporelles données plus haut et modulée avec une sinusoïde à 923 MHz) et il s'agit d'enclencher la génération de ce signal grâce à un dispositif de déclenchement externe (« trigger externe »).

Un dispositif électronique permettant de générer un signal TTL (en créneau) avec des intervalles de temps variables a été réalisé à cet effet et connecté sur l'entrée « trigger externe » du générateur. En revanche, les intervalles de temps entre les créneaux successifs varient de manière pseudo-aléatoire entre 3 μ s et 515 μ s. A ce stade, nous n'avons pas pu mettre en œuvre un moyen de contrôler les intervalles de temps suivant la loi de Weibull.

Certes, cette solution ne permet pas de générer des événements transitoires avec des intervalles de temps qui suivent la loi de Weibull, mais elle permet de mener des essais d'immunité sans devoir fixer arbitrairement la récurrence des perturbations transitoires.

Sur la Fig. 4. 19. on donne un exemple de séquence obtenue à la sortie de ce dispositif sur 5 ms. Ainsi, l'emploi de ce dispositif pour le contrôle du générateur de signaux arbitraires peut permettre d'étudier, en fonction du temps, l'immunité du système GSM-R face à des signaux transitoires qui apparaissent avec des intervalles de temps variables.

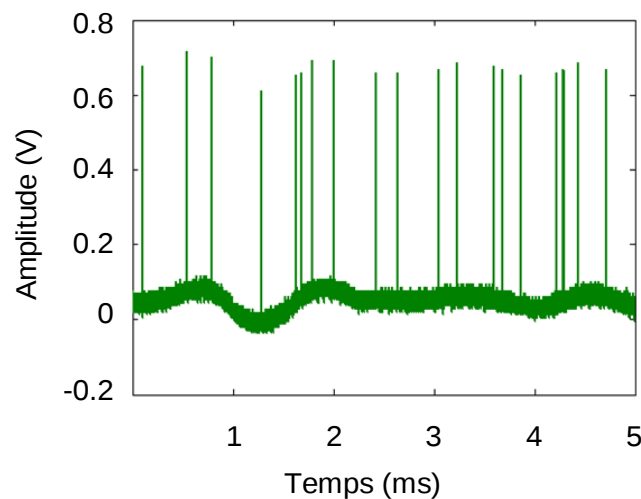


Fig. 4. 19. Exemple de séquence à intervalles pseudo-aléatoires mesurée sur 5 ms à la sortie du dispositif électronique permettant le contrôle du générateur de signaux arbitraires

Sur Fig. 4. 19, on observe que les enveloppes du niveau de bruit et des pics d'amplitude varient légèrement en fonction du temps, ceci est principalement dû à la faible fréquence (5 MHz) d'échantillonnage qui a été appliquée pour mesurer cette séquence. La profondeur

de mémoire de l'oscilloscope étant limitée, nous n'avons pas pu augmenter la fréquence d'échantillonnage pour des fenêtres temporelles aussi longues.

Pour le moment, ce dispositif ne permet pas de générer des intervalles de temps supérieurs à 515 μ s. D'ailleurs, nos analyses actuelles des intervalles de temps sont limitées à 400 μ s et on ne sait pas réellement comment varie ces intervalles au-delà de 400 μ s. On prévoit prochainement une nouvelle campagne de mesure à bord d'un train rapide (TGV) afin d'exploiter une nouvelle technique qui permettra d'étudier les intervalles de temps sur des plages temporelles plus étendues.

Pour présenter un résultat de test d'immunité du système GSM-R face à un scénario d'événements transitoires qui apparaissent avec un intervalle de temps variable, nous avons contrôlé le générateur de signaux arbitraires en employant le dispositif électronique décrit précédemment. Nous avons par la suite utilisé le banc de test d'immunité pour observer l'évolution du BER en fonction du temps. Le BER a été calculé sur 50 trames de voix.

La Fig. 4. 20. donne l'évolution du BER en fonction du temps, sur une minute de mesure, lorsque le SNR est égal à 1. Chaque point présenté sur cette figure fait correspondre la valeur du BER obtenue pour chaque temps de mesure.

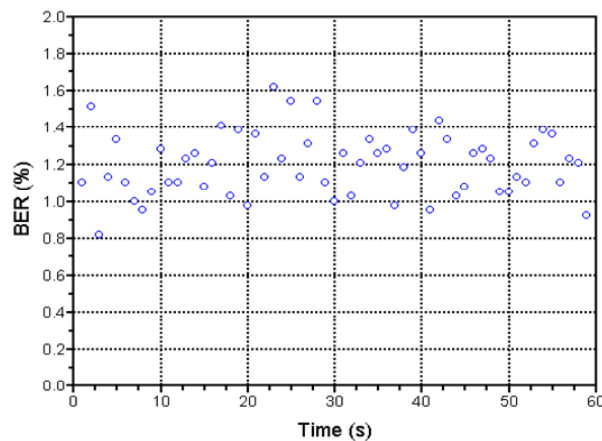


Fig. 4. 20. Evolution du BER en fonction du temps lorsque l'intervalle de temps entre les transitoires varie d'une manière pseudo-aléatoire entre 3 μ s et 515 μ s

Cette figure montre que le BER varie sensiblement lorsque l'intervalle de temps varie au cours du test. En effet, on remarque que le BER varie entre 0.8 % et 1.6 %.

Sur cette figure, on peut facilement identifier les zones et le pourcentage du temps sur les quels la continuité du service GSM-R n'est plus assurée ($\text{BER} > 1.13\%$). Cependant, on rappelle que les intervalles de temps employés ici ne suivent pas la loi de Weibull et ce test ne peut pas être considéré comme représentatif des conditions réelles d'opération d'un train.

Le dispositif électronique de génération de signaux pseudo-aléatoires pourra dans le futur être amélioré afin de générer des séquences dont les intervalles de temps varient suivant des lois parfaitement représentatives de ce qui se passe à bord du train. Néanmoins, pour être

parfaitement représentatif il faut également faire évoluer le rapport signal à bruit au cours de l'essai.

2. Variation du Rapport Signal à Bruit

Comme la récurrence des événements transitoires, le rapport signal à bruit a aussi une très grande importance sur la qualité des transmissions GSM-R. Pour s'approcher des conditions d'opération rencontrées à bord d'un train, il est important de réaliser les tests d'immunité sous des rapports signal à bruit comparables à ce que voit le système GSM-R sous des conditions normales d'opération et par conséquent variables.

Les études réalisées précédemment sur les résultats obtenus lors des campagnes de mesure, ont montré que le niveau de bruit EM ramené par les événements transitoires sur la bande de fonctionnement du système GSM-R à une distance de 20 mètres par rapport au pantographe, se situe entre -70 dBm et -40 dBm, mais la majorité des événements transitoires génèrent des niveaux de bruit qui se concentrent autour de -50 dBm.

Pour connaître le niveau du signal utile du système GSM-R observé le long d'un trajet à bord d'un train, nous avons mesuré le niveau de couverture du système GSM-R à bord d'un train en mouvement sur une ligne équipée d'un réseau GSM-R. Ces mesures se sont déroulées en Belgique, à bord d'un train d'essai de la SNCB.

Pour les besoins de cette mesure, nous avons connecté une antenne GSM-R fixée au-dessus du train à un analyseur de spectre programmé pour mesurer l'amplitude du signal GSM-R reçu par l'antenne (le lien descendant) au cours du trajet.

Les mesures ont été réalisées sur une distance de 16 km avec une vitesse de l'ordre de 70 km/h. Le niveau maximum mesuré sur la bande descendante du système GSM-R sur ce trajet est donné par la courbe bleue de la Fig. 4. 21.

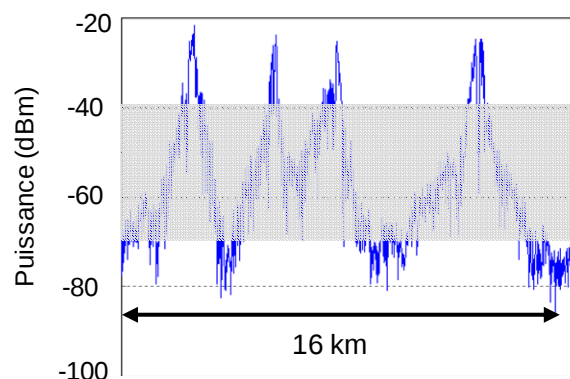


Fig. 4. 21. Niveau de couverture GSM-R sur 16 km de trajet

On remarque que le niveau de couverture varie au cours du trajet en fonction de la distance entre le train et la station de base GSM-R avec laquelle le mobile communique. A proximité des stations de base, le niveau de couverture est de l'ordre de -20 dBm. A mi-distance entre deux stations de base, le niveau de couverture peut descendre jusqu'à -90 dBm. Ces fluctuations importantes du niveau de couverture entraînent une grande variation du rapport signal à bruit.

Pour comparer la couverture du système GSM-R par rapport au niveau de bruit généré par les événements transitoires, il faut garder à l'esprit que les niveaux de bruit ramenés par les événements transitoires sur la bande GSM-R ont été obtenus par l'emploi de la fonction FFT et la couverture GSM-R a été obtenue par un analyseur de spectre.

Pour comparer les résultats de la FFT et les résultats obtenus par un analyseur de spectre, il faudrait voir l'écart de niveau que peut entraîner l'algorithme FFT par rapport à une mesure réalisée par un analyseur de spectre dans une bande de résolution de 120 kHz.

Pour mener des comparaisons rigoureuses, on a choisi de procéder comme suit :

- La première étape consiste à représenter chaque point de mesure obtenu par l'analyseur de spectre par une sinusoïde dont l'amplitude crête correspond au niveau de bruit enregistré par l'analyseur de spectre et la fréquence est de l'ordre de 923 MHz.
- On applique par la suite une FFT sur la sinusoïde obtenue dans la première étape. Cependant, sachant que le niveau de bruit maximum obtenu dans le domaine fréquentiel par la FFT dépend de la longueur temporelle de la fenêtre étudiée, nous avons alors choisi de fixer la longueur de la fenêtre temporelle à une durée équivalente à l'étalement des événements transitoires (tel que celui présenté par la Fig. 4. 11. (a)), soit 30 ns. Cette sinusoïde est présentée sur Fig. 4.22.

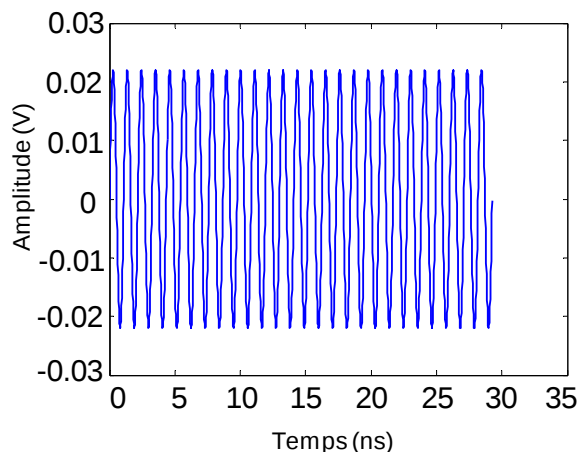


Fig. 4. 22. Signal sinusoïdal avec une amplitude crête de 20 mV et une fréquence de 923 MHz sur une fenêtre temporelle de l'ordre de 30 ns

L'amplitude de la sinusoïde est de 22 mV, cela correspond au niveau maximal mesuré par l'analyseur de spectre, soit -20 dBm.

Ainsi, la différence entre le niveau obtenu dans le domaine fréquentiel par la FFT de la sinusoïde et le niveau enregistré par l'analyseur de spectre, nous renseigne sur l'écart qui peut être introduit entre des mesures réalisées par l'analyseur de spectre et l'application de la FFT sur la bande du lien descendant du système GSM-R.

La Fig. 4. 23. donne l'amplitude du spectre de la sinusoïde présentée Fig. 4. 22., sur la bande 600 MHz – 1200 MHz.

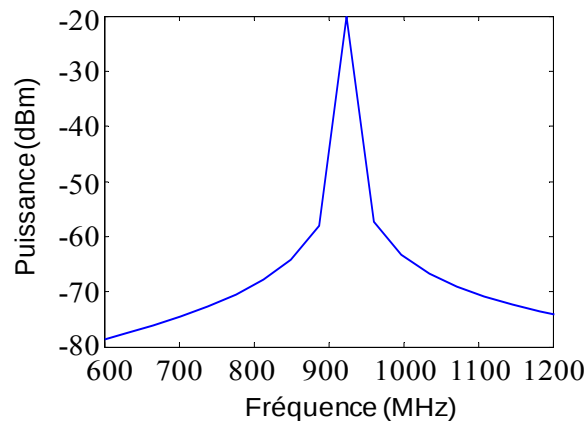


Fig. 4. 23. Amplitude spectrale de la FFT du signal sinusoïdal présenté sur la Fig. 4. 22.

Nous rappelons ici que la résolution fréquentielle de la FFT dépend de la durée de la fenêtre temporelle. Dans notre cas, la fenêtre temporelle étant de l'ordre de 30 ns, la résolution fréquentielle du spectre présenté sur la Fig. 4. 23. est proche 33 MHz. Ceci explique la faible résolution de ce spectre.

L'amplitude maximale obtenue sur ce spectre est de l'ordre de -20.15 dBm, soit un écart de 0.15 dB avec la mesure réalisée à l'aide de l'analyseur de spectre.

Cet écart étant faible, nous ne l'avons donc pas pris en considération lors des comparaisons entre les niveaux de couverture du signal GSM-R et les amplitudes ramenées par les événements transitoires sur la bande du lien descendant du système GSM-R.

Afin de comparer le niveau de couverture du système GSM-R par rapport au niveau de bruit généré par les événements transitoires, la zone ombrée de la Fig. 4. 21. donne l'étalement des niveaux de bruit (exprimé en dBm) générés par les événements transitoires sur la bande de fréquence du lien montant du système GSM-R.

Ainsi, à proximité des antennes relais GSM-R (zones du trajet où le niveau de couverture est situé au-dessus de la zone ombrée), le SNR est toujours supérieur à 0 dB. Sur ces zones, le risque que peut introduire l'apparition des perturbations transitoires sur l'intégrité des informations transmises par le système GSM-R est faible. Sur ces zones la récurrence des

transitoires aura peu d'impact car le rapport signal à bruit est suffisamment élevé pour que les transitoires soient « transparents ».

Par contre, à mi chemin entre deux antennes relais (zones où le niveau de couverture est au-dessous de la zone ombrée), le SNR peut varier entre -50 dB et 0 dB. Sur ces zones, l'intégrité des informations envoyées par le système GSM-R est mise à rude épreuve et dès lors qu'un signal transitoire apparaît sur ces zones, le risque sur le bit envoyé est assez élevé. Ainsi, sur ces zones la récurrence des perturbations transitoires sera le facteur prépondérant sur la qualité de service.

Par contre, sur les zones où le niveau de couverture est compris dans la zone ombrée, le SNR peut varier sensiblement de -30 dB à 30 dB. Donc la qualité des transmissions GSM-R face à l'apparition des perturbations transitoires peut être très variable. En effet, le risque sur l'intégrité des transmissions GSM-R est très important lorsque le SNR est autour de -30 dB et il devient faible lorsque le SNR est de l'ordre de 30 dB.

Pour mener des essais dans des conditions représentatives de cette zone, il est nécessaire de prendre en compte les variations de la récurrence et du rapport signal à bruit. Dans cette zone, il est donc important d'évaluer le SNR produit par les signaux transitoires. Pour ce faire, on peut étudier la distribution statistique des niveaux de bruit EM générés par les événements transitoires dans la bande du lien descendant du système GSM-R. Ainsi, on pourra faire varier en conséquence le SNR au cours des essais (en faisant varier uniquement l'amplitude du signal GSM-R généré par le CMU 200) et estimer les variations du BER introduit par les événements transitoires dans ces zones.

Néanmoins, cette étape n'a pu être réalisée dans le cadre de cette thèse.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche, réalisé dans le domaine de la Compatibilité Electromagnétique (CEM), a consisté à élaborer de nouvelles méthodes de caractérisation de l'environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des nouveaux systèmes embarqués à bord des trains, et plus particulièrement le système de télécommunication numérique GSM-R. Ces travaux de caractérisation sont réalisés afin de connaître les perturbations EM observées par ce système à bord d'un train en mouvement et évaluer par la suite les risques potentiels qu'elles peuvent provoquer sur l'intégrité des informations véhiculées à travers le système GSM-R.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de nouvelles problématiques CEM introduites par l'installation de nouveaux systèmes numériques embarqués à bord des trains dans tous les pays de l'Union Européenne (UE) et a profité des campagnes de mesure réalisées sur des trains d'essai en France dans le cadre du projet européen RAILCOM ou en Belgique.

Dans la première phase, on a essayé d'exploiter les méthodes traditionnelles de caractérisation des environnements électromagnétiques, en l'occurrence la caractérisation fréquentielle et la caractérisation temporelle, afin de connaître d'une manière exhaustive les perturbations EM que peut subir le système GSM-R à bord d'un train en mouvement. Ceci nous a permis d'identifier les perturbations EM qui peuvent nuire au fonctionnement du système GSM-R. Ces travaux ont montré, qu'au sein de l'environnement ferroviaire les perturbations EM transitoires qui apparaissent lors d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe sont les événements qui risquent de nuire le plus à l'intégrité du signal utile du système GSM-R. En effet, ces perturbations transitoires génèrent des bruits qui couvrent facilement les bandes de fréquence de fonctionnement du système GSM-R.

Après cette phase, nous avons essayé de développer une nouvelle méthode de caractérisation de ces bruits permettant d'étudier d'une manière pertinente l'immunité du système GSM-R face aux perturbations transitoires en tenant compte des caractéristiques particulières des protocoles de communication employés par le système GSM-R. Ce système dispose d'un pouvoir de correction et de rectification, défini par son protocole, de quelques trames erronées. Ainsi, ce système peut parfois résister à des perturbations EM transitoires générant un niveau de bruit EM élevé sur sa bande de fonctionnement mais peu fréquentes et peut être gêné par des perturbations EM de faible amplitude spectrale sur sa bande de fonctionnement, mais qui apparaissent fréquemment sur la durée d'une trame. Au vu de ces caractéristiques, il n'est donc pas pertinent de se limiter aux niveaux de bruit générés sur la bande GSM-R. Nous nous sommes donc intéressés aussi aux caractéristiques temporelles et d'amplitude des perturbations EM transitoires, en l'occurrence le temps de montée, la durée temporelle, l'intervalle de temps entre deux perturbations transitoires et leur amplitude crête. L'avantage

de caractériser ce type de paramètre réside dans le fait que ceux-ci peuvent être facilement comparés aux caractéristiques temporelles des protocoles de communication utilisés par le système GSM-R et aussi nous renseigner sur la couverture et l'amplitude spectrale des transitoires observés à bord d'un train en mouvement.

Une étude fine de ces paramètres a été menée au cours de cette thèse. Des investigations ont permis de déterminer l'étalement de ces paramètres sur divers trajets ferroviaires et sous différentes conditions d'opération. On a constaté que les paramètres temporels et d'amplitude des événements transitoires sont très aléatoires sur leurs plages de définition et qu'il était pertinent de les étudier en employant les outils statistiques afin de mieux les appréhender et les modéliser. Nos recherches ont montré que chaque paramètre temporel et d'amplitude peut être modélisé par une loi statistique connue et que les paramètres de chaque loi statistique peuvent varier en fonction des conditions de mesure et/ou d'opération du train.

Compte tenu du caractère aléatoire et des variations importantes observées sur les paramètres des événements transitoires, et afin de faire des tests d'immunité du système GSM-R face à ces bruits transitoires observés à bord d'un train en mouvement, nous avons opté pour l'élaboration de signaux tests composés de scénarios de bruits transitoires statistiquement semblables à ceux observés dans le milieu ferroviaire. Nous avons donc utilisé les lois statistiques obtenues lors de la phase de caractérisation pour développer des scénarios de bruit composés d'événements transitoires dont les caractéristiques comme le temps de montée, la durée temporelle, la récurrence et l'amplitude crête varient d'une manière semblable à ce qui a été observé à bord des trains sous des conditions de fonctionnement normales.

Pour effectuer les tests d'immunité face à ces scénarios de bruit transitoire, un banc d'essai a été développé au sein du laboratoire, employant un générateur de signaux arbitraires, permettant à travers des coupleurs RF d'appliquer à l'entrée d'un mobile GSM-R, qui fonctionne en « Loop back », des scénarios de bruit transitoire. En observant le taux d'erreur binaire (BER) nous avons estimé l'impact des différents paramètres des événements transitoires sur l'intégrité du signal utile du système GSM-R. A l'issue des expérimentations menées au sein du laboratoire nous pensons que l'immunité du système GSM-R face aux événements transitoires dépend principalement de l'intervalle de temps qui sépare l'apparition des événements transitoires successifs sur un scénario de test. Le rapport (noté SNR) entre le niveau de couverture (niveau du signal utile arrivant à l'entrée du mobile) et le niveau de bruit (bruit EM ramené par les bruits transitoires sur la bande de fonctionnement du système GSM-R) a aussi une grande importance sur les résultats d'immunité du système GSM-R face aux bruits transitoires. En effet, dans les zones où le train circule à proximité des stations de base, le SNR est généralement élevé et le risque sur la qualité du service GSM-R est faible. Cependant, lorsque le train est à mi-chemin entre deux stations de base, le risque sur la qualité de service est généralement élevé. Dans les zones intermédiaires, les valeurs des intervalles de temps entre les événements transitoires et le SNR sont tous les deux importants pour la qualité des transmissions GSM-R. A partir de là, les tests d'immunité doivent être menés en reproduisant des conditions d'opération réelles (en terme d'évolution du SNR et de l'intervalle de temps) observées par le système GSM-R à bord d'un train. Il faut donc extraire

des scénarios de test représentatifs de la réalité. Cette démarche peut être adaptée à tout système numérique confronté à des sources de perturbations EM transitoires importantes.

Les résultats présentés dans cette thèse montrent que le niveau de signal utile du système GSM-R peut être facilement modélisé (en fonction de la distance entre le train et les stations de base), il suffit donc d'étudier la récurrence des événements transitoires, sur les zones où le niveau du signal utile n'est pas suffisamment élevé, pour déterminer les régions du trajet sur lesquelles la capacité du système GSM-R peut être affectée. Si les durées et la fréquence des indisponibilités du service GSM-R sur ces zones ne sont pas tolérables pour la sécurité du trafic ferroviaire, on pourra par la suite réfléchir à des solutions permettant de les réduire, notamment déplacer la position de l'antenne GSM-R en l'éloignant du pantographe et de la caténaire, l'amélioration du dispositif de captage de courant, augmenter le niveau de signal utile sur ces zones en installant de nouvelles stations de base par exemple, et dans un cas extrême réduire la vitesse des trains sur ces zones.

Annexe 1

Fiche technique de la locomotive 27000



Type	Locomotive
Nombre d'engins construits	180
Date de livraison du premier engin	02 novembre 2001
Date de livraison du dernier engin	2006
Couplabilité en UM	Entre elles et avec les BB 37000 et BB 37500, jusqu'à deux engins maxi

Caractéristiques générales

Longueur hors tout	19.520 m
Largeur de caisse	
Hauteur maximale au-dessus du rail	
Entre-axe des pivots de bogies	10.060 m
Masse à vide en ordre de marche	90 000 kg
Nombre de bogies	2
Mode de traction	Electrique
Alimentation électrique	25 kV monophasé 50 Hz / 1.5 kV continu
Poste de conduite	Central
Protection anti-crash	Par bouclier absorbeur

Performances	
Traction	
Vitesse maximale	140 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	4167 kW
Effort de traction à la jante au démarrage	320 kN
Effort de traction au régime continu	250 kN (à 60 km/h)
Effort de traction à vitesse maximale	110 kN
Capacités de traction	Remorque d'un train de fret de 800 t à 140 km/h en palier Remorque d'un train de fret de 1800 t à 60 km/h en rampe de 10‰ (profil corrigé)
Freinage	
Distance d'arrêt depuis 140 km/h en palier	970 m
Distance d'arrêt depuis 120 km/h en palier	
Distance d'arrêt depuis 80 km/h en palier	
Performances générales	
Kilométrage annuel moyen d'un engin	

<u>Chaudron</u>	
Matériau du châssis	Acier
Matériau de la caisse	Acier

Bogies	
Type	
Châssis	Cadre
Matériau du châssis	Acier
Construction	Mécano-soudé
Entraînement caisse-bogie	Par barres de traction basse
Empattement	2.600 m

Diamètre de roue neuve	
Diamètre de roue usée	
Transmission de l'effort de traction	Type canonbox
Rapport global de transmission	
Suspension primaire	Ressorts hélicoïdaux sur boîtes d'essieux
Suspension secondaire	Ressorts hélicoïdaux
Amortissement	Amortisseurs anti-galop sur suspension primaire Amortisseurs anti-lacets caisse-bogie Amortisseurs transversaux caisse-bogie
Equipements de traction	
Captage	
Nombre de pantographes	2
Types	
Règles d'utilisation	1 pantographe, suivant la tension d'alimentation
Contrôle-commande	
Mode de commande	Commande manuelle par manipulateur traction / freinage électrodynamique Consignes d'effort transmises par réseau informatique Dispositif de Vitesse Imposée
Equipements de puissance	
Schéma de traction	Par bogie : 1 ponts monophasé à commutation forcée par moteur 1 onduleur de tension par moteur
Indépendance de commande	Bogie par bogie (mais il est possible de n'isoler qu'un seul des deux moteurs de traction pour la plupart des cas des panne)
Type de commande	Electronique à micro-processeur
Redressement de la tension d'alimentation	Pont monophasé à commutation forcée
Transformateur	25 kV à 4 enroulements secondaires (1 par moteur de traction)
Tension d'alimentation des équipements de traction	1 500 V continu
Technologie des équipements de puissance	Onduleur et pont monophasé à IGBT Semi-conducteurs refroidis par circulation d'eau

Moteur de traction	
Type	Triphasé asynchrone
Masse	
Nombre	1 par essieu
Installation	Dans le bogie
Puissance unitaire maximale	1 050 kW
Vitesse maximale de rotation	
Réducteur	Flasqué sur le moteur
Equipements de freinage	
Contrôle-commande	
Mode de commande	Pneumatique à deux conduites type UIC Commande de frein direct
Equipements de freinage	
Frein électrodynamique	Type à récupération et rhéostatique , amorçable depuis la haute tension ou la batterie 1 hacheur de freinage par bogie
Puissance en freinage électrodynamique	1 265 kW à la jante par bogie en freinage rhéostatique 1 985 kW à la jante par bogie en freinage par récupération
Frein mécanique	1 semelle double de deux fois 255 mm par roue, actionnée par un bloc de freinage
Matériau de friction	Composite
Effort maximal de freinage par bogie	
Commande des freins	Conjugaison locale bogie par bogie des freins électrodynamique et mécanique par l'électronique de commande + distributeur UIC (1 par bogie)
Frein de parking	A ressort, à application automatique
Nombre de freins de parking	1 par bogie
Equipement d'antienrayage	Antienrayeur à régulation du glissement sur le frein électrodynamique uniquement
Mode d'action de l'antienrayeur	Bogie par bogie

Production d'air comprimé		
	Principale	Auxiliaire
Nombre d'unités de production d'air	1	1
Type de compresseur	A vis	A pistons
Débit nominal du compresseur		50 NI/mn sous 9 bar
Type de sécheur principal	Bi-colonnes, à adsorption	Mono-colonne, à adsorption
Production d'énergie électrique auxiliaire		
Alimentation des auxiliaires du train	Absence d'alimentation pour auxiliaires des trains de voyageurs	
Alimentation des auxiliaires de l'engin	Convertisseur statique de type hacheur, à IGBT	
Nombre de convertisseurs	2	
Puissance unitaire		
Tension d'alimentation des auxiliaires de l'engin	525 V continu	
Type de batteries	Cadmium-Nickel	
Nombre de blocs batteries	1 par bloc moteur	
Réseau basse tension	72 V continu	
Confort thermique		
Type	Chauffage / climatisation	
Nombre	1 unité par cabine de conduite	
Chauffage		
Climatisation	Par soufflage d'air réfrigéré	
Contrôle-commande	Par électronique dédiée	
Alimentation		
Equipements de sécurité		
Types de signalisations compatibles	Répétition des signaux KVB MEMOR2+ (5 engins équipés)	

Informations complémentaires

La BB 27000 est la première locomotive "informatisée" de la SNCF : son contrôle/commande fait largement appel à un réseau véhicule sur base FIP. Elle se positionne ainsi au même niveau que les engins européens les plus récents, notamment notamment la BR 185 de la DB.

Annexe 2

Fiche technique de la locomotive 26000



Type	Locomotive
Nombre d'engins construits	234
Date de livraison du premier engin	1er avril 1988
Date de livraison du dernier engin	23 juillet 1998
Couplabilité en UM	Non

Caractéristiques générales

Longueur hors tout	17.710 m
Largeur de caisse	3.026 m
Hauteur maximale au-dessus du rail	4.270 m
Entre-axe des pivots de bogies	9.684 m
Masse à vide en ordre de marche	88 825 kg
Nombre de bogies	2
Mode de traction	Electrique
Alimentation électrique	25 kV monophasé 50 Hz / 1.5 kV continu
Poste de conduite	A gauche
Protection anti-crash	Par bouclier absorbeur

Performances

Traction	
Vitesse maximale	200 km/h
Puissance maximale à la jante en traction	5 600 kW
Effort de traction à la jante au démarrage	320 kN
Effort de traction au régime continu	220 kN (à 80 km/h)
Effort de traction à vitesse maximale	100 kN
Capacités de traction	Remorque d'un train de voyageurs de 750 t (16 voitures) à 200 km/h en rampe de 2,5‰ Remorque d'un train de fret de 2050 t à 80 km/h en rampe de 8,8‰ (profil corrigé)
Freinage	
Distance d'arrêt depuis 200 km/h en palier	1 675 m
Distance d'arrêt depuis 160 km/h en palier	1 100 m
Distance d'arrêt depuis 120 km/h en palier	655 m
Performances générales	
Kilométrage annuel moyen d'un engin	200 000 km

Chaudron

Matériau du châssis	Acier
Matériau de la caisse	Acier

Bogies

Type	
Châssis	Cadre
Matériau du châssis	Acier
Construction	Mécano-soudé
Entraînement caisse-bogie	Par barres de traction basse
Empattement	2.797 m
Diamètre de roue neuve	1 250 mm
Diamètre de roue usée	1 180 mm

Transmission de l'effort de traction	Par arbre creux et anneau dansant
Rapport global de transmission	2.1894
Suspension primaire	Ressorts hélicoïdaux sur boîtes d'essieux
Suspension secondaire	Blocs sandwich acier-caoutchouc
Amortissement	Amortisseurs anti-galop sur suspension primaire Amortisseurs anti-lacets caisse-bogie Amortisseurs transversaux caisse-bogie
Equipements de traction	
Captage	
Nombre de pantographes	2
Types	AM90 (25 kV 50 Hz AL2 (1.5 kV continu)
Règles d'utilisation	1 pantographe, suivant la tension d'alimentation
Contrôle-commande	
Mode de commande	Commande manuelle par manipulateur traction / freinage électrodynamique Consignes d'effort transmises par lignes basse tension Dispositif de Vitesse Imposée
Equipements de puissance	
Schéma de traction	Par bogie : 1 pont mixte à commutation naturelle 1 hacheur 1 onduleur de courant
Indépendance de commande	Bogie par bogie
Type de commande	Electronique à micro-processeur
Redressement de la tension d'alimentation	Pont mixte à commutation forcée
Transformateur	25 kV à 2 enroulements secondaires : 1 pour la traction et les auxiliaires locomotive, 1 pour les auxiliaires convoi
Tension d'alimentation des équipements de traction	1 500 V continu
Technologie des équipements de puissance	Onduleur, hacheur et pont mixte à thyristors Semi-conducteurs refroidis par immersion dans des

	cuves étanches contenant du fluide frigorigène
Moteur de traction	
Type	Triphasé synchrone autopiloté
Masse	6 400 kg
Nombre	1 par bogie
Installation	Dans le bogie
Puissance unitaire maximale	2 800 kW
Vitesse maximale de rotation	1 930 tr/mn
Réducteur	Suspendu dans le bogie Accouplement élastique avec le bogie
Equipements de freinage	
Contrôle-commande	
Mode de commande	Pneumatique à deux conduites type UIC avec commande de l'assistance électrique sur le train (F.E.P.) Commande de frein direct
Equipements de freinage	
Frein électrodynamique	Type rhéostatique , amorçable depuis la haute tension ou la batterie
Puissance en freinage électrodynamique	1 485 kW à la jante par bogie en freinage de service commandé par le frein pneumatique 1 410 kW à la jante par bogie en freinage de maintien commandé par manipulateur traction/freinage électrodynamique
Frein mécanique	1 semelle double de deux fois 250 mm par roue, actionnée par un bloc de freinage
Matériau de friction	Composite
Effort maximal de freinage par bogie	2325 daN de 200 km/h à 165 km/h 4650 daN de 165 km/h à 0
Commande des freins	Conjugaison locale bogie par bogie des freins électrodynamique et mécanique par l'électronique de commande + distributeur UIC (1 par bogie)
Frein de parking	A ressort, à application automatique
Nombre de freins de parking	1 par bogie
Equipement d'antienrayage	Antienrayeur à régulation du glissement
Mode d'action de l'antienrayeur	Bogie par bogie

Production d'air comprimé		
	Principale	Auxiliaire
Nombre d'unités de production d'air	1	1
Type de compresseur	A vis	A pistons
Débit nominal du compresseur	2 800 NI/mn sous 9 bar	50 NI/mn sous 9 bar
Type de sécheur principal	Bi-colonnes, à adsorption	Mono-colonne, à adsorption
Production d'énergie électrique auxiliaire		
Alimentation des auxiliaires du train	Ligne de train 1500 V prélevée directement à la caténaire ou sur un l'enroulement auxiliaire du transformateur principal	
Alimentation des auxiliaires de l'engin	Convertisseur statique de type hacheur, à thyristor (jusqu'à BB 26132) ou GTO	
Nombre de convertisseurs	2	
Puissance unitaire		
Tension d'alimentation des auxiliaires de l'engin	525 V continu	
Type de batteries	Cadmium-Nickel	
Nombre de blocs batteries	1 par bloc moteur	
Réseau basse tension	72 V continu	
Confort thermique		
Type	Chauffage	
Nombre		
Chauffage		
Climatisation	Non	
Contrôle-commande	Manuel	
Alimentation		
Equipements de sécurité		
Types de signalisations compatibles	Répétition des signaux KVB	

Informations complémentaires

Commandées à l'origine à 264 exemplaires, les 30 derniers engins ont fait l'objet d'un avenant donnant naissance aux 30 premières BB 36000 ("Astride").

Références bibliographiques

Chapitre 1

- [I-1] **R. Retiveau**
La Signalisation Ferroviaire
Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées, Janvier 1987
- [I-2] **M. Berbineau**
Les Systèmes de Transmission Sol-Train. Etat de l'art et perspective
ELSEVIER- Recherche Transport Sécurité N°62, Spécial Transport
Intelligent, 1^{er} trimestre 99
- [I-3] **M. Wahl**
Les Réseaux de Terrain Embarqués dans les Transports Guidés
Les Collections de l'INRETS, synthèse N° 45, Juillet 2003
- [I-4] **J-E Terrier**
Histoire de Courbe. La Radio Sol Trains à la SNCF (1976-2002)
Revue Flux&ID, 2003/4, N°54, pp 83-86
- [I-5] **The European Commission's Directorate-General for Energy and Transport**
ERTMS – Delivering Flexible and Reliable Rail Traffic
Office for Official Publications of the European Communities, 2006
<http://ec.europa.eu/transport/rail/interoperability/doc/ertms-en.pdf>
- [I-6] **X. lagrange, P. Godlewski, S. Tabbane**
Réseaux GSM-DCS - Des principes à la norme
Hermes - réseaux et télécommunications, Septembre 1996
- [I-7] **R. Esposito, A. Sanseviero, A. Lazzaro, P. Marmo**
Formal Verification of ERTMS Euroradio Safety Critical Protocol
Proceedings of FORMS 2003: Symposium on Formal Methods for Railway Operation
and Control Systems, May 15-16, 2003, Budapest, Hungary
- [I-8] <http://cordis.europa.eu/transport/src/morane.htm>
- [I-9] <http://eirene.uic.asso.fr>
- [I-10] **R. Holmes**
Electromagnetic Compatibility of Electrified Railways
Proceedings of the International Conference on Electric Railways in a United Europe,
Amsterdam, Netherlands, 27-30 March 1995, pp 131-135

- [I-11] **J.R. Martin, F. Castellons, N. Santiago**
Wide Band with Corona Model
Proceedings II PSCC Conference, Avignon, 1993, pp 899-905
- [I-12] **Z.A. Styczynski, S. Bacha, A. Bachry, L. Etxeberria**
Improvement of EMC in Railway Power Networks
10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Magdeburg, Germany, 6-9 October 2002
- [I-13] **D. Grahame Holmes, T. A. Lipo**
Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice
Wiley-IEEE Press, October 2003
- [I-14] **C.M. Wiggins, D.E. Thomas, F.S. Nickel, T.M. Salas, S.E. Wright**
Transient Electromagnetic Interference in Substations
IEEE Transactions on Power Delivery, October 1994, Vol. 9, N°4, pp 1869-1884
- [I-15] **M. Vaughan et.al.**
Remote Monitoring of Power System faults using VLF Waves
International Conference on Electrical Engineering, Vol.2, 1998, pp.614
- [I-16] **J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby**
Power System Dynamics and Stability Hardback
Wiley & Sons, 1997
- [I-17] **E.J. Bartlett, M. Vaughan, P.J. Moore**
Investigations into Electromagnetic Emissions from Power System Arcs
EMC 99 : electromagnetic compatibility, York, UK, 12-13 July 1999
- [I-18] **R.J. Hill**
Electric Railway Traction Tutorial Part 6: Electromagnetic Compatibility - Disturbance Sources and Equipment Susceptibility
IET Power Eng. Journal., February 1997, Vol. 11, N° 1, pp 31–39
- [I-19] **X. Cheng, L.I Li**
The Characteristics of Radiative Interference (RI) Caused by AC Electrified Railroad in VHF Band
Proceeding of the International Symposium On Electromagnetic Compatibility, Ch. 172, pp 475-478
- [I-20] **EN 50121**
Railway Applications, Electromagnetic Compatibility
European Standards EN 50121: CENELEC 2006
- [I-21] **CISPR 16-1**
Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods Part 1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus
IEC International Special Committee on Radio Interference

[I-22] CISPR 16-2

Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods
Part 2: Methods of Measurement of Disturbances and Immunity
IEC International Special Committee on Radio Interference

[I-23] CISPR 18

Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High-Voltage Equipment
IEC International Special Committee on Radio Interference

[I-24] CISPR 22

Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Information Technology Equipment
IEC International Special Committee on Radio Interference

Chapitre 2

[II-1] S. Braun, F. Krug, P. Russer

A novel automatic digital quasi-peak detector for a time domain measurement system
EMC Europe 2004, 9-13 August. 2004, Eindhoven, The Netherlands

[II-2] A. Wisten, P. Makikallio

Methods of Measuring Electromagnetic Emission from Trains
EMC Europe 2004, Eindhoven, The Netherlands

[II-3] www.railcom.info

[II-4] C. Catz

Analyseurs de Fourier
Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Contrôle, Ref. R1156, 10 janvier 1996

Chapitre 3

[III-1] EN 61000-4-4

*Electromagnetic Compatibility Part 4: Testing and Measurement Techniques-
Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test*
European Standard, May 2001

[III-2] ETSI EN 300386

Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM)
European Standard, Telecommunication Network Equipment, ElectroMagnetic Compatibility (EMC), requirements, March 2000

[III-3] NIST/SEMATECH

e-Handbook of Statistical Methods
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, January 2003

[III-4] C. Lemoine

Contribution à l'Analyse Statistique des Mesures en Chambre Réverbérante à Brassage de modes – Applications à la Détermination de l'Efficacité de Brassage et de l'Incertitude de Mesure dans un Contexte CEM et Radiofréquence
Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Juillet 2008

[III-5] J.F. Massey

The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit
Journal of the American Statistical Association, Vol. 46, PP 68-78, 1951

[III-6] F. Z. Moreno

Modélisation du Pantographe
Rapport de Stage 2ème année d'études d'ingénieur de Polytech-Lille, Juillet 2009

Chapitre 4

[IV-1] S. Dudoyer

Mise en Œuvre de Tests d'Immunité des Communications GSM-R Face aux Perturbations Electromagnétiques Présentes dans l'Environnement Ferroviaire
Rapport de Stage de fin d'études d'ingénieur de Polytech-Lille, Août 2008, ISRN INRETS/RE_08_727-FR

[IV-2] Rohde & Schwarz

CMU Operating Manual
Test and Measurement Division, V4-5

[IV-3] M. Camp, H. Garbe

Parameter estimation of double exponential pulses (EMP, UWB) with least squares and Nelder Mead Algorithm
IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2004, Vol. 46, N°4, pp. 675-678

[IV-4] UIT-T-REC-K.48

Prescriptions de Compatibilité Electromagnétique pour les Equipements de Télécommunication – Recommandation Relative aux familles de produits
Serie K : Protection contre les Perturbations, Septembre 2006

[IV-5] S. Dudoyer, R. Adriano, V. Deniau, J. Rioult, N. Ben Slimen, B. Meyniel

Testing of the GSM-R System against Electromagnetic Disturbances Present in the Railway Environment
ITST 2009, Lille, France, October 2009

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

Brevet

V. Deniau, N. Ben Slimen, J. Rioult
Générateur de scénarios de bruit électromagnétique
INRETS, N° FR 08 54 734, 11/07/2008
En cours d'extension dans l'international

Journaux

N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer, S. Baranowski
Statistical Characterisation of the EM Interferences Acting on the Communications Between Trains and Control Centers
The European Physical Journal - Applied Physics, Published online: 22 September 2009

V. Deniau, N. Ben Slimen., S. Baranowski, H. Ouaddi, J. Rioult, N. Dubalen
Characterisation of the EM Disturbance Affecting the Safety of the Railway Communication Systems
The European Physical Journal - Applied Physics, 2008, pp 225-230

Conférences

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, October 2009

S. Dudoyer, R. Adriano, V. Deniau, J. Rioult, N. Ben Slimen, B. Meyniel
Testing of the GSM-R System against Electromagnetic Disturbances Present in the Railway Environment
ITST 2009, Lille, France, October 2009

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, Hambourg, Germany, September 2008

N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau, R. Adriano, S. Baranowski, P. Massy
Analyse Temporelle des Perturbations EM Transitoires Observées à Bord d'un Train en Mouvement Afin de Protéger les Systems de Communication Embarqués
CEM 08, Paris, France, Juin 2008

N. Ben Slimen
Etude Statistique des Caractéristiques Temporelles des Perturbations Electromagnétiques Rencontrées à Bord d'un Train en Mouvement
Journée des doctorants de l'INRETS, Lille, France, Avril 2008

N. Ben Slimen., V. Deniau, J. Rioult, S. Baranowski, B. Demoulin

Caractérisation du Bruit Electromagnétique 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

Conférence invitée, GDR Ondes, Assemblée générale, Pessac, France, Novembre 2007

N. Ben Slimen, V. Deniau, S. Baranowski, J. Rioult, N. Dubalen, B. Démoulin, Consortium Railcom

On Board Measurements of the Railway's Electromagnetic Noise with Moving Train
Proceedings of the 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Zurich 2007, Munich, Germany, September 2007

V. Deniau, J. Rioult, N. Ben Slimen, H. Ouaddi, N. Dubalen

Characterisation of the Electromagnetic Disturbances Received by GSM-R Antennas in Usual Railway Operating Conditions

EMC Europe Workshop 2007, Paris, France, June 2007

V. Deniau, N. Ben Slimen, S. Baranowski, H. Ouaddi, J. Rioult, N. Dubalen

Characterisation of the EM Disturbance affecting the Safety of the Railway Communication Systems

Proceedings of the 2007 IET Colloquium on Reliability in Electromagnetic Systems, Paris, France, May 2007

N. Ben Slimen

Recherche de Procédure de Caractérisation du Bruit EM à Bord d'un Train en Mouvement

Journée des doctorants de l'INRETS, Lille, France, Avril 2007

Résumé :

L'intégration récente des systèmes de communication numériques embarqués à bord des trains pour la gestion du trafic introduit de nouveaux problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) dans le milieu ferroviaire, notamment, pour le système GSM-R « Global System for Mobile Communications - Railway » sur lequel se focalisent les travaux de la thèse. Ce système permet la transmission de la voix et des informations de trafic entre le train et les centres de contrôle et emploie un émetteur récepteur embarqué à bord du train connecté par câble blindé à une antenne GSM-R fixée au dessus de la locomotive. Vue l'importance de ce système pour la sécurité du trafic ferroviaire européen, il faut s'assurer que ses capacités de fonctionnement ne sont pas affectées par les perturbations EM qu'il rencontre dans cet environnement. Par ailleurs, le GSM-R est un système numérique élaboré employant des protocoles de communication qui lui permettent de résister à certaines perturbations électromagnétiques. Ainsi, son immunité électromagnétique ne peut pas être étudiée selon les méthodes traditionnelles standardisées, puisqu'elles sont adaptées principalement à des systèmes analogiques.

La thèse consiste à caractériser l'environnement EM ferroviaire d'une manière adaptée au contexte du système GSM-R. En effet, il faut préalablement connaître les perturbations EM qu'il peut rencontrer au sein du milieu ferroviaire, notamment les perturbations EM que peuvent subir ses signaux utiles à l'endroit de fixation des antennes GSM-R. Ainsi, nous avons exploité les méthodes fréquentielle et temporelle pour caractériser les perturbations EM que peut subir son signal utile au sein de cet environnement. Les résultats obtenus ont montré que les perturbations EM transitoires qui apparaissent lors d'un mauvais contact entre la caténaire et le pantographe sont la source principale de perturbations EM pour le système GSM-R. Ainsi, nous avons étudié minutieusement leurs caractéristiques temporelles et d'amplitude à travers une étude statistique de chaque paramètre. Suite aux résultats obtenus, nous avons pu générer des signaux de test représentatifs de ce que peut voir le système GSM-R à bord d'un train avant d'exploiter ces signaux pour l'étude de l'immunité EM de ce système en laboratoire.

Summary :

The management of the European railway traffic will be ensured by the use of train's embedded communication systems, particularly the GSM-R (Global System for Mobile communications – Railways). This system is exposed to the EM interferences observed on board trains and its EM immunity has to be guaranteed. However, the immunity of the GSM-R cannot be studied according to the current standardized methods mainly developed for the test of analog systems. The GSM-R is a digital communication system having the ability to stand to some EM interferences, and its immunity has to be performed according to new methodologies considering these particular characteristics.

The aim of this work is to develop new methodologies to characterize the railway EM environment adapted to the context of the GSM-R communication system. Firstly, the frequency and temporal measurement methods have been used in order to characterize the EM interferences observed on the GSM-R antennas in railway environment. The obtained results have shown that the transient EM events taking place between the catenary and the pantograph are the main source of disturbances for the GSM-R system. In order to study the immunity of this system against transient EM disturbances, in the second part, we have characterized these transients in terms of time and amplitude parameters. In the following, a statistical study of each parameter has been performed, and we have developed signals for immunity tests statistically similar to the observed railway environment's interferences. At the end, the test signals have been used in order to study the immunity of the GSM-R system in a laboratory context.