



HAL
open science

Comparaison entre différentes méthodologies de test d'immunité des transmissions GSM-R

Stephen Dudoyer, Virginie Deniau, N. Ben Slimen, Jean Rioult, B. Meyniel

► To cite this version:

Stephen Dudoyer, Virginie Deniau, N. Ben Slimen, Jean Rioult, B. Meyniel. Comparaison entre différentes méthodologies de test d'immunité des transmissions GSM-R. CEM 2010, 15ème colloque international sur la compatibilité électromagnétique, Apr 2010, Limoges, France. 6p. hal-00615184

HAL Id: hal-00615184

<https://hal.science/hal-00615184>

Submitted on 18 Aug 2011

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

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

COMPARAISON ENTRE DIFFERENTES METHODOLOGIES DE TEST D'IMMUNITE DES TRANSMISSIONS GSM-R

S. Dudoyer* - V. Deniau* - N. Ben Slimen* - J. Rioult* - B. Meyniel**

*Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, INRETS, LEOST, F-59650 Villeneuve d'Ascq, e-mails : nom@inrets.fr

**ALSTOM, 11-13 avenue de Bel Air, 69627 Villeurbanne, benoit.meyniel@transport.alstom.com

Résumé. Le système GSM-R est en cours de déploiement sur le réseau ferroviaire européen afin d'uniformiser les systèmes de communication et de signalisation entre les pays. A terme, il assurera la transmission de la voix entre les agents et des informations de signalisation qui s'afficheront sur le tableau de bord. Ainsi, l'intégrité des données est essentielle pour garantir la sécurité du réseau. Cependant, ces transmissions sont soumises à des perturbations EM sévères. Ainsi, des tests d'immunité en présence de bruits EM représentatifs des conditions réelles doivent être menés pour évaluer les risques lors des transmissions. Ce papier présente deux méthodes de test pour les transmissions GSM-R. L'une repose sur un banc de test utilisant le mode conduit, l'autre emploie le mode rayonné en chambre anéchoïque. Nous proposons d'analyser les résultats obtenus avec ces deux méthodes.

I. INTRODUCTION

Afin de satisfaire au besoin d'interopérabilité des trains sur le réseau ferroviaire européen, un système de communication et de signalisation commun à tous les pays est en cours de déploiement en Europe : le GSM-R (Global System for Mobile communications-Railways). Il permettra les communications entre les trains mais aussi entre les trains et les centres de contrôle. A terme, il devra assurer l'acheminement des informations de signalisation directement sur le tableau de bord. Le système GSM-R est constitué de deux principaux éléments : des stations de base (BTS) installées le long des voies et des mobiles GSM-R embarqués à bord des trains et connectés à des antennes fixées sur le toit. Du fait de leur proximité avec la caténaire, les antennes GSM-R réceptionnent des perturbations EM transitoires produites lors des pertes de contact entre la caténaire et le pantographe. Des travaux préalables [1] sur la caractérisation de ces perturbations, ont montré qu'elles pouvaient avoir des incidences significatives sur la qualité des signaux GSM-R reçus par le train. Or, compte tenu de l'importance des informations transmises par ce système, il est essentiel d'en garantir l'immunité face aux perturbations EM présentes dans le milieu ferroviaire. Ce papier traite donc des méthodes que nous avons mises en place pour tester l'immunité du système GSM-R face à des perturbations EM représentatives de celles rencontrées à bord des trains. Nous commencerons par rappeler les principales caractéristiques des perturbations transitoires, ce qui permettra de mettre en évidence que les méthodes de test d'immunité actuellement en vigueur ne sont pas adaptées

à cette problématique. Après avoir défini les caractéristiques des signaux de test et les critères d'immunité utilisés, nous présenterons les deux méthodologies et analyserons les déformations des signaux de test par chacun des bancs d'essais. Nous terminerons par une comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes de test afin d'évaluer leur reproductibilité.

II. COMMUNICATIONS GSM-R ET PERTURBATIONS TRANSITOIRES

Les perturbations transitoires observées à bord des trains trouvent leur source dans les pertes de contact entre la caténaire et le pantographe. Il arrive fréquemment au cours d'un trajet ferroviaire que le pantographe se décolle de la caténaire, créant ainsi une variation brutale du courant de part et d'autre du contact qui a pour conséquence l'apparition d'évènements transitoires rapides. Les campagnes de mesures que nous avons réalisées à bord de trains en mouvement ont montré que :

- La fréquence d'apparition de ce phénomène est très variable et dépend de plusieurs paramètres (usure de la caténaire, conditions climatiques, vitesse du train...)
- Les intervalles de temps entre les perturbations transitoires EM successives réceptionnées par les antennes GSM-R peuvent varier de quelques secondes à quelques microsecondes
- Ces perturbations EM transitoires sont large bande et couvrent les bandes de fréquences dédiées au système GSM-R
- Le niveau de bruit ramené par les transitoires sur les bandes de fréquences du GSM-R peut être suffisamment élevé pour altérer la qualité des signaux
- Les perturbations EM transitoires reçues par les antennes GSM-R sont très brèves. Leurs durées sont généralement inférieures à 20 ns.

En pratique, le GSM-R utilise des mobiles embarqués à bord du train et connectés à des antennes fixées en toiture ainsi que des stations de base installées régulièrement le long des voies. Le mobile GSM-R est connecté à un réseau avec lequel il échange en permanence des informations. Lorsque les données sont transmises du train vers la BTS, on dit que la communication se produit sur le lien montant (à l'inverse, de la BTS vers le mobile,

c'est le lien descendant qui est employé). D'après les spécifications [2], la puissance des signaux reçus par les antennes GSM-R (lien descendant) peut varier de -20 dBm à -95 dBm. En revanche les signaux du lien montant sont émis par les antennes GSM-R avec une puissance beaucoup plus élevée que les niveaux réceptionnés sur le lien descendant. Par conséquent un signal transitoire peut, à condition de produire un niveau de bruit suffisant, perturber la réception des signaux GSM-R mais a très peu de chances d'en affecter l'émission.

III. TESTS D'IMMUNITÉ AUX TRANSITOIRES

La référence en matière de tests d'immunité EM à des perturbations transitoires est la norme européenne EN 61000-4-4 [3]. Cette norme permet d'évaluer l'immunité d'un équipement électrique ou électronique en présence de transitoires rapides en salve sur ses différentes entrées. Elle définit la méthodologie à employer ainsi que les types de signaux de test à utiliser pour pratiquer les essais. Cependant, nous ne pouvons pas nous y référer pour l'étude de l'immunité d'un système de communication tel que le GSM-R. D'une part, la méthode d'essai préconisée n'est pas adaptée pour tester notre système. En effet, elle consiste à injecter les signaux de test sur chacun des ports de l'équipement sous test (EST) à l'aide d'une pince de couplage capacitive. Ainsi, si l'on choisissait de s'appuyer sur cette méthodologie pour nos essais, il faudrait placer une pince de couplage sur le câble reliant le mobile GSM-R au dispositif d'émission/réception des signaux de communication. La figure 1 donne une illustration du type de banc de test que l'on pourrait alors mettre en place.

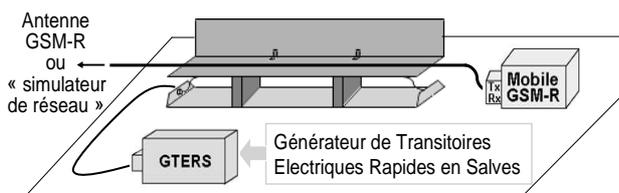


Fig.1 – Méthode de test d'immunité basée sur la méthodologie décrite dans la norme EN 61000-4-4.

Il est évident que l'utilisation d'une telle pince va augmenter la difficulté d'étalonnage des signaux de test. Or tester l'immunité d'une transmission numérique exige beaucoup de précision au niveau de l'étalonnage des signaux de perturbation. En effet, une transmission numérique utilise des puissances très faibles et à quelques dB près l'impact d'une perturbation extérieure peut considérablement différer. De même, les séquences de signaux de test sont figées en raison de l'emploi d'un générateur qui émet des salves de transitoires avec une cadence bien définie. Enfin, toujours d'après la méthodologie de test décrite dans la norme 61000-4-4, à l'issue de l'exposition aux perturbations transitoires il faut simplement vérifier que l'EST continue de

fonctionner correctement pour s'assurer de son immunité vis-à-vis des perturbations auxquelles il vient d'être soumis. Si ce procédé est parfaitement adapté pour tester « l'électronique » d'un équipement, il ne l'est en revanche pas pour évaluer l'effet des perturbations sur l'intégrité des données transmises.

D'autre part, les perturbations transitoires telles qu'elles sont définies dans cette norme ne sont pas représentatives des perturbations transitoires produites par le contact imparfait entre la caténaire et le pantographe [4]. Les différences que nous avons constatées portent sur les valeurs des caractéristiques de temps (durée, temps de montée, taux de répétition) des transitoires. Ces valeurs doivent être soigneusement définies car elles ont un impact sur la puissance de bruit générée sur les bandes de fonctionnement du GSM-R. Pour illustrer ce point, nous présentons sur le même graphe (Fig.2) les représentations temporelles d'un signal transitoire collecté à bord d'un train en mouvement et d'un modèle de transitoire qui est une double exponentielle utilisant les valeurs de caractéristiques de temps données dans la 61000-4-4 (durée $D=50$ ns, temps de montée $RT=5$ ns). Pour faciliter la comparaison, les deux courbes ont subi une normalisation à 1 de la valeur pic.

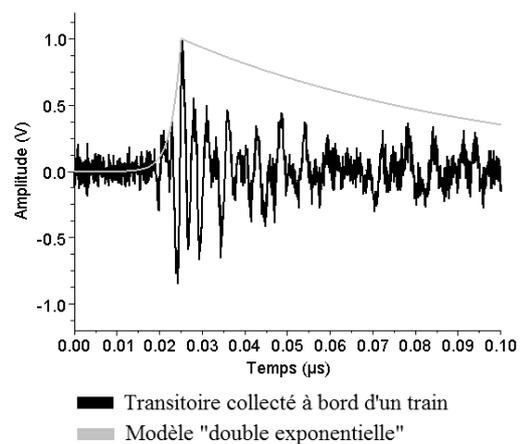


Fig.2 – Comparaison entre un signal transitoire collecté à bord d'un train en mouvement et un transitoire de test décrit dans la norme EN 61000-4-4.

On observe que les deux formes d'onde sont très différentes. Le transitoire enregistré est plus complexe puisqu'il est constitué d'une succession de fronts montants et descendants alors que le modèle ne comporte qu'un front montant et un front descendant. Il est aussi plus rapide que le modèle, ce qui est particulièrement visible avec le premier front montant du signal transitoire réel qui est nettement plus rapide que celui de la double exponentielle. Cette différence va nécessairement impacter la largeur de la gamme des fréquences couvertes. Par conséquent une double exponentielle utilisant les valeurs de D et RT définies dans la norme EN 61000-4-4 ne permet pas de modéliser les perturbations EM observées à bord des trains lors des pertes de contact entre la caténaire et le pantographe.

IV. TESTS D'IMMUNITÉ ADAPTÉS AU GSM-R

IV.1. Définition des signaux de test

Compte tenu des caractéristiques du système dont on cherche à tester l'immunité, le signal de test doit vérifier plusieurs propriétés :

- Il doit être représentatif de l'effet des perturbations agissant lors des pertes de contact caténaire-pantographe
- Il doit permettre de centrer l'énergie du signal sur la bande 800 – 1000 MHz pour limiter les déformations des signaux de test par les composants du banc de test (coupleurs, circulateur, antennes...)
- Il doit produire un niveau de puissance sur le lien descendant (921-925 MHz) suffisamment élevé
- Cette puissance doit être constante sur toute la bande de fréquences 921-925 MHz afin de garantir la reproductibilité des essais quelque soit le canal GSM-R utilisé
- Il ne doit pas perturber le lien montant, donc le bruit produit sur le lien montant (876-880 MHz) doit être constant et faible

La prise en compte de l'ensemble de ces conditions nous a mené à construire un signal de test composé d'une double exponentielle multipliée par un sinus à une fréquence (F) donnée. L'équation du signal de test est donc la suivante :

$$S(t) = A \times \left(e^{-\frac{1}{D}t} - e^{-\frac{1}{RT}t} \right) \times u(t) \times \sin(2\pi Ft) \quad (1)$$

où u est la fonction échelon.

Les représentations temporelle et fréquentielle de ce modèle (nommé « modèle sinus expo ») sont données sur Fig.3 pour une fréquence $F=923$ MHz et des valeurs de D et RT identifiées comme typiques de celles rencontrées lors d'une rupture de contact caténaire-pantographe. En effet, des campagnes de mesures effectuées à bord de trains ont permis de collecter un grand nombre d'évènements transitoires reçus par des antennes GSM-R. Chaque évènement se distingue des autres par sa durée et son temps de montée. Une étude statistique menée sur ces signaux a permis d'extraire des valeurs typiques pour ces deux paramètres [1] : $D=5$ ns et $RT=0.4$ ns.

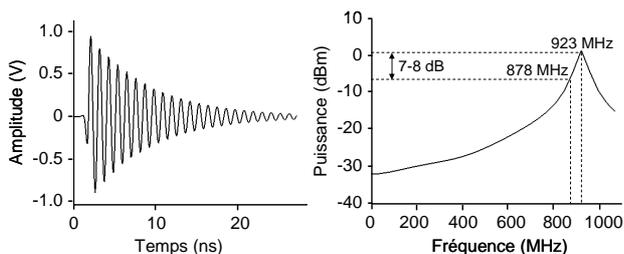


Fig.3 – Représentations temporelle et fréquentielle du signal de test utilisé.

Il est important de noter (même si cela n'est pas très visible sur le graphe en raison de l'échelle utilisée) que le niveau de bruit ramené par le modèle sinus expo est constant (variation ≤ 1 dB) sur la bande 921 – 925 MHz. Cela tient à la valeur choisie pour D qui fixe la largeur de la bande de fréquences sur laquelle le bruit est « plat ».

Pour les tests d'immunité, nous construisons des séquences de test composées de signaux tels que défini en (1). L'intervalle de temps entre deux transitoires consécutifs (voir Fig.4) sera constant au sein d'une même séquence de test.

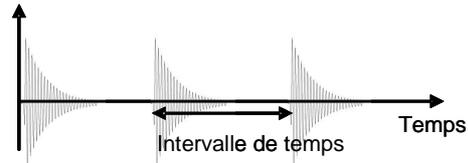


Fig.4 – Intervalle de temps entre deux transitoires successifs.

Toutefois au cours des essais, différentes valeurs d'intervalle de temps seront utilisées (de 10 μ s à 1.7 ms) pour créer des séquences avec des fréquences de répétition différentes. Ces séquences de test seront ensuite générées pour étudier l'impact de la récurrence des transitoires sur le BER (Bit Error Rate) d'une communication GSM-R.

IV.2. Méthodes d'injection des signaux de test

Deux modes d'injection des perturbations transitoires pouvaient être mis en œuvre pour nos tests :

- Le mode rayonné pour lequel il est nécessaire de se placer en chambre anéchoïque. Il s'agit alors de générer une perturbation EM, calibrée, rayonnée entre l'antenne d'émission et celle de réception.
- Le mode conduit qui permet de s'affranchir des antennes et qui consiste à envoyer des perturbations sur un câble support de la communication entre l'émetteur et le récepteur.

IV.3. Critères d'immunité

A bord des trains, le paramètre contrôlé pour quantifier la qualité du signal de réception est le « Rxqual ». Celui-ci est fourni par le mobile GSM-R toutes les 500 ms au cours du trajet. Ce paramètre est mesuré à partir des séquences d'apprentissage contenues dans les trames réceptionnées par le mobile. Actuellement, les opérateurs ferroviaires imposent que le « Rxqual » soit inférieur à 3 pour garantir un minimum de qualité. Nous nous sommes donc fondés sur cette donnée pour établir un critère d'immunité. L'avantage de ce paramètre est qu'il peut aussi être exprimé en termes de BER car une table de correspondance existe entre ces deux grandeurs [4]. Nous avons choisi de procéder à des mesures de BER, défini comme suit [5] :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}} \times 100 \% \quad (2)$$

A l'issue des mesures, les valeurs prises par ce paramètre seront comparées à la valeur-limite exigée par les opérateurs ferroviaires qui imposent un $Rxqual \leq 3$, soit un $BER \leq 1.13\%$ d'après la table de correspondance. Les résultats seront également comparés au BER estimé à partir de la relation (3) établie dans [6].

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_r}{R_s} \quad (3)$$

où R_r est le taux de répétition des transitoires (Repetition rate) et R_s , le débit binaire en ligne du système de transmission (Symbol Rate = 277833 bits/s).

Cette estimation repose sur plusieurs hypothèses telles que :

- Toutes les perturbations transitoires couvrent les fréquences du GSM-R avec un niveau comparable au signal utile
- La perturbation transitoire est très courte devant la durée de transmission d'un bit et peut être considérée comme un événement ponctuel
- A chaque fois qu'un bruit transitoire est émis, on va générer une décision aléatoire sur l'interprétation du bit concerné

Ainsi, (3) revient à considérer que lorsqu'une perturbation transitoire se produit avec un niveau comparable au signal utile, elle a une probabilité de 0.5 d'affecter une donnée binaire.

V. DESCRIPTION DES METHODES DE TEST

V.1. Description de la méthodologie de test

Pour réaliser nos tests d'immunité, nous avons développé deux bancs : l'un utilisant le mode conduit et l'autre le mode rayonné. Tous deux nous permettent d'établir une liaison GSM-R et de la soumettre à des bruits EM représentatifs de ceux observés à bord d'un train. Chacun des bancs se compose de trois parties, à savoir :

- **Le système de communication** : il comprend le mobile GSM-R et un « Analyseur de RadioCommunication (ARC) ». L'« ARC » envoie des transmissions GSM-R sur le lien descendant et réceptionne les réponses du mobile GSM-R sur le lien montant comme le ferait une BTS. Par comparaison entre les séquences qu'il émet et celles que réceptionne le mobile, il peut également effectuer des mesures de BER.
- **La génération des signaux de bruit EM** : on génère des signaux de bruits transitoires que l'on a préalablement « chargés » dans le générateur de signaux arbitraires.
- **Le contrôle du rapport signal à bruit** : il s'agit de contrôler les puissances des signaux de communication et des bruits EM à l'entrée du mobile GSM-R.

V.2. Banc de test en mode conduit

Le schéma de principe de ce banc est présenté Fig.5. L'« ARC » émet sur le dernier canal GSM-R (924.8 MHz) du lien descendant. Le mobile GSM-R est quant à lui configuré en mode « loop back », cela signifie qu'il réémet sur une deuxième voie les trames qu'il réceptionne. Ces trames sont ainsi renvoyées à l'« ARC » qui calcule le BER en appliquant la formule (2).

L'analyseur de spectre permet de contrôler les puissances des signaux utile et de bruit qui parviennent à l'entrée du mobile. Il est alors possible de déterminer et de régler le rapport signal à bruit (SNR) à l'entrée du mobile.

Enfin, un circulateur est placé à la sortie du générateur de signaux arbitraires afin de le protéger des signaux émis par le mobile GSM-R.

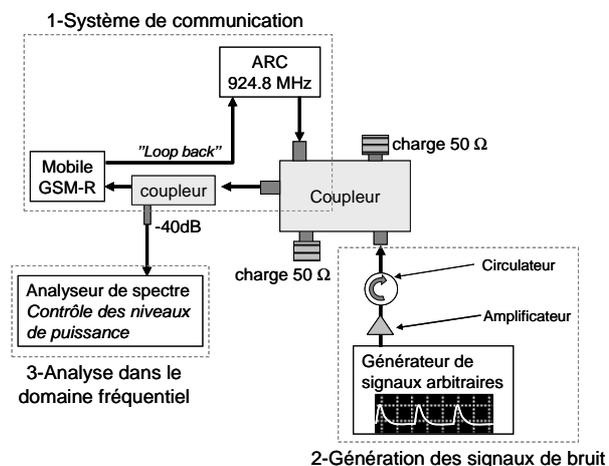


Fig.5 – Banc pour les tests d'immunité en mode conduit.

V.3. Banc de test en mode rayonné

Les tests en mode conduit exigent l'utilisation d'un circulateur qui peut déformer les signaux de test. Mener des essais en mode rayonné permet de s'affranchir de ce dispositif et de mieux contrôler les caractéristiques temporelles des bruits transitoires pour étudier leurs impacts sur les transmissions GSM-R. Pour transposer les tests en mode rayonné, trois antennes (une antenne GSM-R et deux antennes cornet placées à 1 m de la première) sont utilisées pour assurer la communication et l'émission des perturbations transitoires. Le banc est schématisé Fig.6.

Une antenne cornet est connectée à l'« ARC » qui joue le rôle de station de base et établit le lien de communication descendant. L'antenne GSM-R, qui réceptionne le lien descendant, est connectée au mobile via un coupleur. Ce coupleur permet de mesurer les signaux atteignant l'entrée du mobile et d'étalonner la puissance des bruits transitoires afin de contrôler le rapport entre le signal utile et le bruit EM. Enfin, une deuxième antenne large bande est employée pour émettre au sein de la chambre anéchoïque les perturbations transitoires. Le taux d'erreur engendré par les bruits transitoires est calculé par l'« ARC » comme dans le cas précédent.

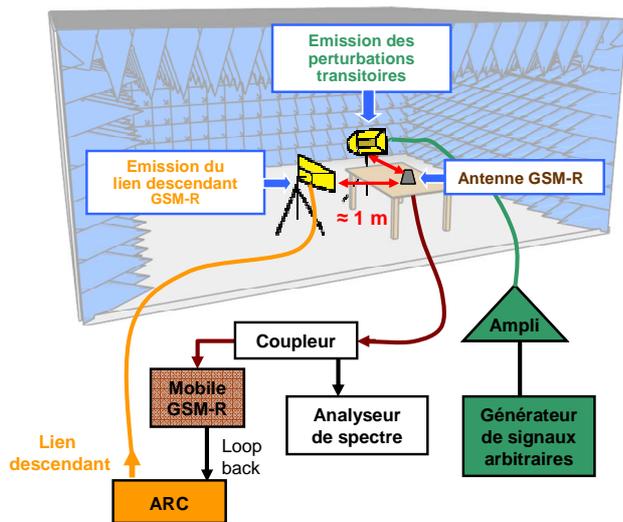


Fig.6 – Configuration de test en chambre anéchoïque.

VI. DEFORMATIONS DES SIGNAUX DE TEST

Comme expliqué dans la section IV, le signal de test est constitué d'une double exponentielle multipliée par un sinus. Avant de parvenir au mobile, ce signal passe par différents composants du banc de test qui le déforment. Les déformations subies par le transitoire sont différentes en modes conduit et rayonné puisque ce ne sont pas les mêmes équipements qui composent les deux bancs de test. En particulier, en mode conduit, le signal de test est amplifié à l'aide d'un simple « préampli 27 dB » alors que le mode rayonné nécessite l'utilisation d'un amplificateur de puissance (30 Watts dans le cas présent). Dans cette partie nous analysons, dans les domaines temporel et fréquentiel, les déformations du signal de test pour chaque mode d'injection. Dans chaque cas, les signaux de test sont contrôlés en sortie du générateur de signaux arbitraires et à l'entrée du mobile GSM-R.

VI.1. Déformations dans le domaine temporel

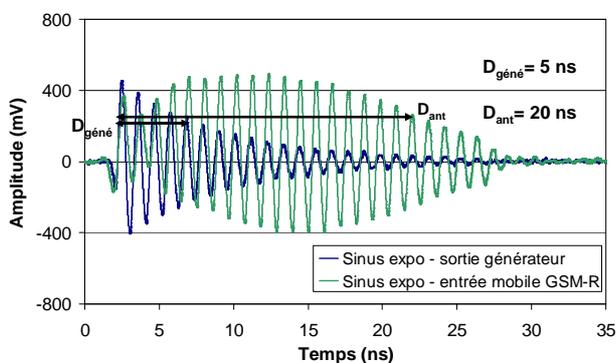


Fig.7 – Signal de test en sortie du générateur et entrée du mobile – mesures en mode conduit.

Afin de comparer les formes d'onde atteignant l'entrée du mobile dans les deux bancs d'essais, nous avons ajusté l'amplification en sortie du générateur de signaux

arbitraires afin de produire un niveau de bruit identique (en modes conduit et rayonné) sur le canal 923 MHz. Les formes d'onde en entrée du mobile sont comparées à celles générées Fig.7 et 8. On note, pour les deux bancs, que les temps de montée sont plus longs à l'entrée du mobile qu'en sortie du générateur. Quelque soit le mode d'injection utilisé, les signaux qui parviennent au système de communication ont des durées plus longues (même si encore très brèves car ≤ 20 ns) que les signaux initialement générés. Néanmoins, en mode rayonné la valeur pic est plus élevée qu'en mode conduit pour lequel l'énergie est d'avantage étalée sur le temps.

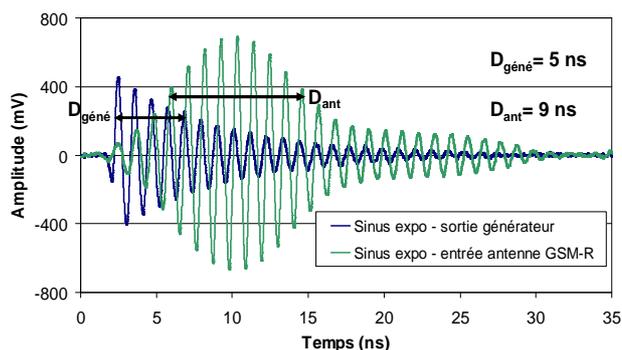


Fig.8 – Signal de test en sortie du générateur et entrée du mobile – mesures en mode rayonné.

VI.2. Déformations dans le domaine fréquentiel

Afin d'analyser les déformations dans le domaine spectral tel que dans le domaine temporel, le réglage de l'amplification a été conservé. On constate d'ailleurs sur les figures 9 et 10, que l'on atteint pour les deux bancs une puissance de -51 dBm à 923 MHz (mesurée en max hold sur l'analyseur de spectre).

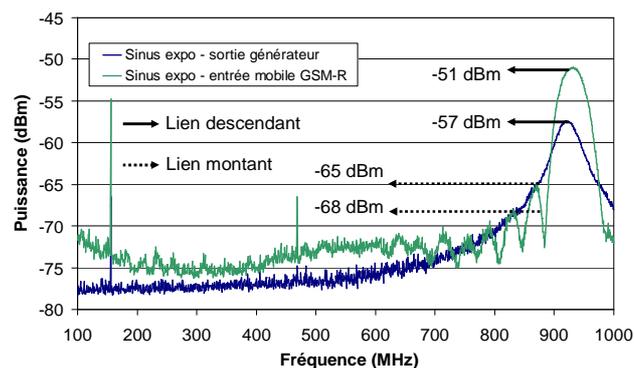


Fig.9 – Spectre du signal de test en sortie du générateur et entrée du mobile – mesures en mode conduit.

On remarque que les déformations subies par les signaux de test à travers les deux bancs différent. Dans le cas du mode rayonné, les signaux en sortie du générateur et en entrée du mobile sont très comparables (excepté la différence de niveau qui provient de l'amplification). En revanche, le banc en conduit déforme davantage le signal. Notamment, on constate que la bande de fréquences couverte est plus étroite et que le signal comporte des harmoniques de part et d'autre de la bande couverte.

Toutefois, pour les deux modes d'injection, les exigences que l'on s'est fixé dans la section IV.1 sont respectées malgré les déformations. En effet, les niveaux de bruit sont comparables et stables sur les liens montant et descendant et la puissance ramenée sur le lien descendant est nettement plus faible (d'au minimum 8 dB) que sur le lien montant. Cela provient de la forme d'onde utilisée car moduler une double exponentielle par un sinus à 923 MHz permet de concentrer la puissance sur les bandes désirées et préserver les caractéristiques spectrales du signal. En revanche une double exponentielle avec les caractéristiques définies dans la norme EN 61000-4-4 aurait subi plus de déformations (dus à l'impact des antennes notamment).

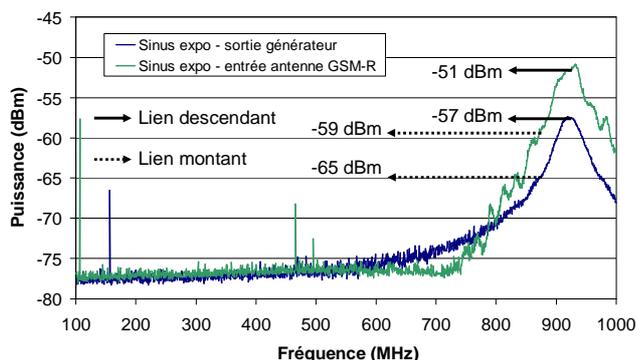


Fig.10 – Spectre du signal de test en sortie du générateur et entrée du mobile – mesures en mode rayonné.

VII. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS EN MODES CONDUIT ET RAYONNE

Nous avons procédé à des mesures de BER en présence de signaux de bruits transitoires générés sous la forme de séquences telles que définies en IV.1 et produisant un SNR égal à 1 à l'entrée du mobile. Les résultats que nous présentons Fig.11 ont été obtenus pour des essais au cours desquels nous avons fait varier l'intervalle de temps entre deux transitoires successifs de 10 à 1700 μ s.

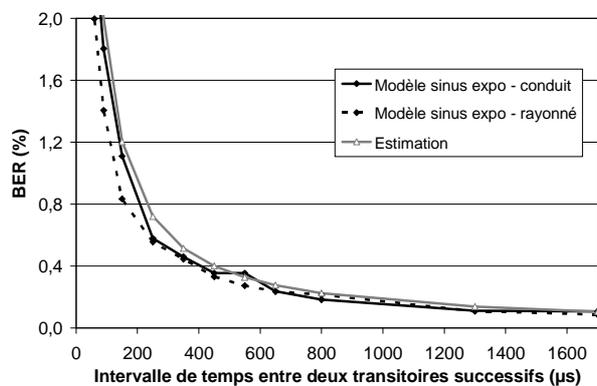


Fig.11 – Evolution du BER en fonction de l'intervalle de temps - mesures en modes rayonné et conduit.

On note que premièrement, que ce soit en mode conduit ou rayonné, l'évolution du BER est fonction de l'intervalle de temps entre deux transitoires successifs.

Ensuite, cette évolution est similaire dans les deux cas, ce qui montre que chaque mode d'injection permet de conserver les caractéristiques des signaux de test auxquelles le système GSM-R est sensible. En particulier, les perturbations transitoires viennent couvrir les bandes du GSM-R de la même façon (cf. partie VI). Enfin, chacune des deux courbes concorde avec notre courbe d'estimation ce qui confirme ce qui a été considéré avec (3), à savoir qu'une perturbation transitoire qui se produit avec un niveau comparable au signal utile a 50 % de chance d'affecter la donnée binaire.

VIII. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté et comparé deux méthodes pour tester l'immunité des communications GSM-R face à des perturbations transitoires. Le signal de test utilisé a été défini et les déformations qu'il subit lors de son émission ont été analysées dans les domaines temporel et fréquentiel pour chaque banc d'essais. Cette analyse a montré que de par sa définition, le modèle de transitoire venait couvrir les bandes de fréquences du GSM-R de la même façon en conduit et en rayonné, ce qui explique les résultats similaires obtenus pour ces deux modes d'injection lors des tests d'immunité. Enfin la loi d'estimation du BER, précédemment proposée afin de prédire l'impact des perturbations transitoires sur des transmissions GSM-R, a été validée pour chacun des modes d'injection des perturbations EM transitoires sous la condition d'un SNR égal à 1.

REFERENCES

- [1] N. Ben Slimen, V. Deniau, J. Rioult, S. Dudoyer and 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 Sept. 2009.
- [2] UIC Project EIRENE, "System Requirements Specification", v14.0, 21 Oct. 2003.
- [3] Compatibilité électromagnétique – Partie 4-4 : techniques d'essai et de mesure - essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salve, Norme européenne EN 61000-4-4, Juin 1995.
- [4] S. Dudoyer, R. Adriano, V. Deniau, N. Ben Slimen and B. Meyniel, "Testing of the GSM-R System against Electromagnetic Disturbances present in the Railway Environment", ITST 2009, Lille, Oct. 2009.
- [5] Gary Breed, "Bit Error Rate: Fundamental Concepts and Measurement Issues", High Frequency Electronics, vol. 2, no. 1, pp. 46-48, Janvier 2003.
- [6] R. Adriano, N. Ben Slimen, V. Deniau, M. Berbineau and P. Massy, "Prediction of the BER on the GSM-R communications provided by the EM transient disturbances in the railway environment", EMC Europe, Hamburg, Sept. 2008.