



HAL
open science

METHODE DE PRE-SCAN POUR ACCELERER LES TEMPS DE MESURE DU SCAN CHAMP PROCHE EN IMMUNITE

Alexandre Boyer, Fabrice Caignet

► **To cite this version:**

Alexandre Boyer, Fabrice Caignet. METHODE DE PRE-SCAN POUR ACCELERER LES TEMPS DE MESURE DU SCAN CHAMP PROCHE EN IMMUNITE. 21ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM 2023), Jun 2023, Toulouse, France. hal-04203229

HAL Id: hal-04203229

<https://laas.hal.science/hal-04203229>

Submitted on 11 Sep 2023

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.

METHODE DE PRE-SCAN POUR ACCELERER LES TEMPS DE MESURE DU SCAN CHAMP PROCHE EN IMMUNITE

A. Boyer¹, F. Caignet¹

¹ LAAS-CNRS, Univ. de Toulouse, INSA-Toulouse, Toulouse, France, alexandre.boyer@laas.fr, fcaignet@laas.fr

Résumé. L'article présente une approche de "pré-scan", basée sur l'utilisation d'un générateur de peigne, pour accélérer les temps de mesure du scan champ proche en immunité appliquée sur carte et composant électronique.

I. INTRODUCTION

Le scan champ proche en immunité (ou *Near Field Scan Immunity* - NFSI) est un formidable outil de diagnostic pour détecter et localiser les défaillances liées aux perturbations électromagnétiques (EM) sur carte et circuit intégré [1]. Récemment, il a été montré comment cette méthode pouvait être utilisée pour évaluer l'immunité rayonnée [2] [3]. La Fig.1 décrit un banc NFSI typique injectant sur un dispositif sous test (DST) une perturbation harmonique (CW). La méthode souffre cependant d'un défaut majeur qui limite son utilisation industrielle : le temps de mesure excessif, selon la surface à scanner, la plage de fréquence à analyser, le nombre de points spatiaux et fréquentiels.

Afin de réduire le temps de scan, il serait nécessaire d'identifier au préalable les zones et les fréquences d'intérêt, où le DST présente des minima d'immunité. Un scan en injection CW pourrait ensuite se concentrer avec un pas de recherche plus fin sur ceux-ci. Dans cet article, nous proposons une méthode de scan basée sur une injection large bande pour identifier rapidement les points d'intérêt pour le NFSI en injection CW. Ce type d'injection large bande peut s'apparenter, dans une certaine mesure, au développement récent des essais de perturbations multi-tons [4], pour étudier l'immunité d'équipements électroniques sous des perturbations complexes, plus représentatives des environnements EM modernes. La grande versatilité des générateurs multi-tons, qui s'accompagne d'un coût élevé, est surdimensionnée par rapport au seul besoin d'évaluer rapidement l'immunité d'un équipement sur une large bande de fréquence. Dans ce contexte, un générateur de peigne, capable de produire une perturbation composée de plusieurs harmoniques de même amplitude et phase, répond plus facilement et à moindre coût à ce besoin.

Le but de cet article est de démontrer que l'utilisation d'un tel générateur constitue un moyen de pré-scan rapide capable d'accélérer considérablement la méthode NFSI en injection CW. Après une rapide illustration du problème de temps de mesure du NFSI, la troisième partie de l'article décrit les caractéristiques du générateur de peigne utilisé dans cette étude, suivi de la présentation de la chaîne d'injection utilisée. La cinquième partie montre à travers un cas d'étude (un test d'immunité conduite sur une référence de tension) la corrélation existante pour ce

circuit entre des tests d'immunité CW et large bande. Enfin, le même cas d'étude est réutilisé pour montrer le gain de temps apporté par ce type de pré-scan dans la mise en œuvre du NFSI.

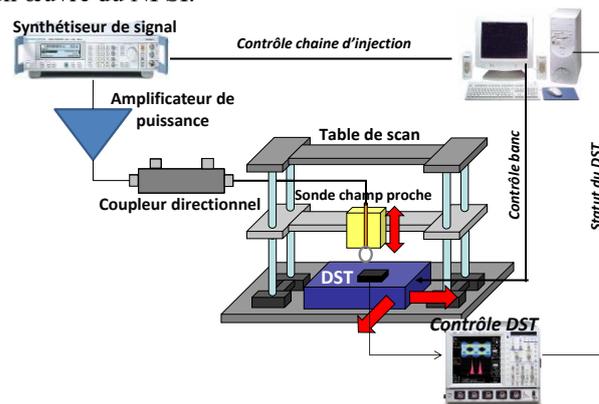


Fig.1. Principe du banc de scan champ proche en immunité

II. TEMPS DE MESURE DU NFSI EN INJECTION HARMONIQUE

L'extraction de la cartographie d'immunité en champ proche est un processus nécessitant un grand nombre d'itérations. Il consiste à répéter, pour différentes positions de la sonde d'injection au-dessus du dispositif sous test (DST) une recherche du seuil de susceptibilité de ce dernier pour différentes fréquences de perturbation. L'équation (1) donne le nombre maximal N d'itérations de recherche de défaillance, où N_p est le nombre de positions spatiales de la sonde d'injection, N_f le nombre de fréquences testées et N_e le nombre de valeurs données à l'excitation de la sonde d'injection, s'incrémentant au cours du test entre une puissance minimale et maximale.

$$N = N_p N_f N_e \quad (1)$$

Par exemple, pour une zone de scan de 200 points, une bande de test constituée de 20 fréquences et 20 points d'excitation, 80000 itérations sont requises pour reconstituer complètement la cartographie NFSI. La durée de l'essai est principalement dominée par le temps d'application de la perturbation, de configuration des instruments de mesure et de récupération des résultats de mesure. En supposant la durée d'une itération égale à 3 s, la durée totale de l'essai est alors égale à 66 h soit presque 3 jours. Cette durée est excessive et constitue un frein majeur à l'utilisation de cette méthode de diagnostic de l'immunité. Réduire la durée de l'essai revient à limiter le nombre d'itérations N en diminuant un ou plusieurs termes

de (1). Dans un premier temps, l'utilisateur peut élargir le pas de scan pour réduire N_p , diminuer N_f et élargir le pas de recherche du seuil de susceptibilité pour diminuer N_e . Cependant, cette stratégie a ses limites puisqu'elle peut conduire à manquer des fréquences sensibles, et donnera une estimation grossière du seuil d'immunité. Une autre approche consiste à réaliser un pré-scan pour identifier rapidement les zones sensibles du DST et réduire ainsi N_p pendant la phase de scan proprement dite. L'expérience montre qu'en raison du caractère locale de l'injection champ proche, le DST ne présente aucune défaillance pour de nombreuses positions de la sonde d'injection. Le pré-scan peut se faire à un niveau de perturbation constante ($N_e = 1$) en appliquant pour les différentes fréquences N_f le niveau d'excitation maximale. En reprenant l'exemple ci-dessus, le nombre d'itérations du pré-scan est limité à 4000, mais la durée du pré-scan reste longue (> 3 h). Pour accélérer le pré-scan, il conviendrait aussi de réduire N_f . Une autre solution consiste à utiliser une source de perturbation large bande, capable de générer simultanément un grand nombre d'harmoniques réparties sur toute la bande de test avec un écart suffisamment faible pour éviter de manquer une bande de fréquence sensible. Un générateur de peigne constitue une telle source. En reprenant l'exemple précédent, le nombre d'itérations serait limitée à 200. Au bout de 10 minutes, le pré-scan fournirait à l'utilisateur tous les points de scan où le DST est vulnérable, lui permettant de limiter le scan final à ces points.

III. CARACTERISTIQUES DU GENERATEUR DE PEIGNE

Le pré-scan précédemment décrit repose sur l'utilisation d'un générateur de peigne générant une perturbation composée de plusieurs harmoniques sur plusieurs décades. Dans cette étude, le générateur de peigne utilisé est le modèle TBCG2 développé par Tekbox [5]. Ce générateur abordable (environ 100 € selon les distributeurs) fournit un signal large bande relativement plat entre 1 MHz et 2.5 GHz, à partir d'une excitation sinusoïdale de fréquence comprise entre 1 MHz et 350 MHz. La puissance de sortie est comprise entre 10 et 20 dBm. La Fig.2 présente le profil temporel typique de l'impulsion émise par le générateur excité en entrée par un signal sinusoïdal à 10 MHz. Il s'agit d'une impulsion courte d'environ 400 ps répétée toutes les 100 ns. L'analyse fréquentielle du signal montre que son

spectre est constitué d'un grand nombre d'harmoniques. L'amplitude des raies est quasi constante (à 6 dB près) jusqu'à environ 1.6 GHz et leur phase est quasi-constante. L'utilisation de ce générateur dans une chaîne d'injection nécessite de garantir que la puissance moyenne, mais surtout la puissance crête du signal, n'excède pas la puissance d'entrée maximale de l'amplificateur de puissance. Une caractérisation du générateur de peigne est donc requise.

La Fig.2 présente l'évolution de la puissance de sortie du générateur de peigne en fonction de la puissance du signal sinusoïdal d'entrée ($F = 10$ MHz), exprimée en puissance moyenne (P_{moy}) et crête (P_{crete}). Entre 8 et 20 dBm, la distribution spectrale n'évolue quasiment pas. La puissance de sortie n'évolue pas linéairement en fonction de la puissance d'entrée. Son excursion est de 30 dB pour une plage exploitable de 12 dB en entrée. L'ajout d'un atténuateur réglable peut être requis pour accroître la plage de puissance fournie en entrée de l'amplificateur de puissance placée en sortie du générateur de peigne. L'écart entre les puissances crête et moyenne (facteur de crête) est constant pour une fréquence donnée (25 dB à 10 MHz).

Afin de simplifier l'utilisation du générateur de peigne, un modèle de signal à bande passante limitée et à spectre plat est considéré. Celle-ci est définie comme la plage de fréquence où l'amplitude des harmoniques ne s'éloigne pas de plus de 6 dB de l'harmonique la plus élevée. Selon la fréquence d'excitation du générateur, la bande passante est comprise entre 1.6 et 2 GHz. La puissance moyenne par harmonique $P_{harmoniBW}$ peut être calculée. A partir de ce modèle, la puissance moyenne du signal est recalculée à l'aide de l'égalité de Parseval (2), ainsi que la puissance crête (3) où P_i est la puissance moyenne en mW de l'harmonique de rang i et N est le nombre d'harmoniques comprises dans la bande passante du signal. Le facteur de crête CF est déterminé par (4). Avec une bande passante de 1.6 GHz et une fréquence d'excitation de 10 MHz, CF est estimé à 25 dB, ce qui est conforme avec la mesure. Les puissances moyennes et crêtes prévues par ce modèle sont en accord avec celles mesurées, comme le montre la Fig.2.

$$P_{moyBW}(dBm) = 10\log(\sum_{i=1}^N P_i) = P_{harmoniBW} + 10\log(N) \quad (2)$$

$$P_{creteBW}(dBm) = P_{harmoniBW} + 20\log(N) + 3 \quad (3)$$

$$CF(dB) = 10\log(N) + 3 \quad (4)$$

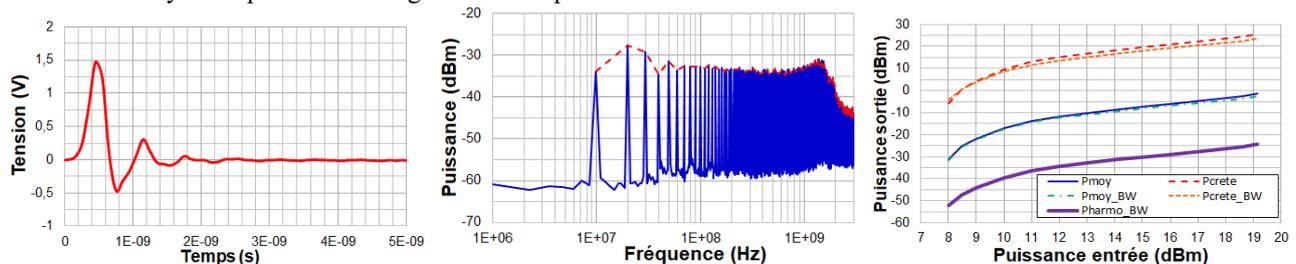


Fig.2. Profil temporel (gauche) et spectre (centre) du signal généré par le générateur de peigne ($F = 10$ MHz, $P = 13$ dBm) - Evolution de la puissance moyenne et crête en fonction de la puissance du signal d'entrée ($F = 10$ MHz) (droite)

IV. CHAÎNE D'INJECTION LARGE BANDE

Pour un niveau de puissance donnée en entrée, P_{crete} est quasi constante avec la fréquence. Il en résulte que la puissance moyenne est inversement proportionnelle au nombre d'harmoniques. L'utilisation d'un grand nombre N permet de tester l'immunité sur une large bande de fréquence ou de garantir un pas fréquentiel suffisamment faible, mais au détriment d'un CF plus élevé. La saturation arrive pour une puissance moyenne plus faible, limitant ainsi la capacité de l'approche à identifier des défaillances sous de forte puissance moyenne, sauf à utiliser un amplificateur de forte puissance. Il convient donc de définir un nombre N acceptable pour limiter le CF. Deux solutions sont envisageables : utiliser une fréquence d'excitation suffisamment grande, et/ou ajouter un filtre passe-bas/bande pour limiter N . Une stratégie possible est de réaliser des tests limités à une bande de fréquence. Elle présente aussi l'avantage d'une identification rapide des bandes de fréquence d'intérêt, sur lesquelles le DUT est le plus vulnérable. Afin de mettre en œuvre cette stratégie, la chaîne d'injection décrite à la Fig.3 est proposée. Selon le découpage en bande de fréquence de test, un filtre peut être connecté en sortie du générateur de peigne, par exemple à l'aide d'un switch RF. La fréquence d'excitation peut être adaptée pour garantir un CF acceptable. Un atténuateur peut aussi être connecté en sortie du générateur de peigne pour ajuster la puissance en entrée de l'amplificateur de puissance. Un coupleur directionnel et un wattmètre peuvent être placés en sortie d'amplificateur pour mesurer la puissance moyenne délivrée.

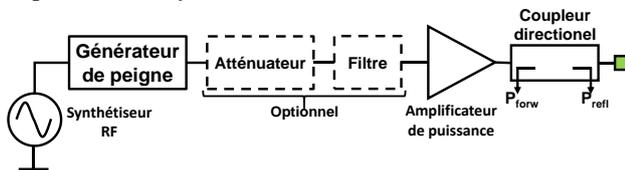


Fig.3. Chaîne d'injection large bande

V. EQUIVALENCE ENTRE RESULTATS D'ESSAI D'IMMUNITE CW ET LARGE BANDE

L'utilisation du générateur de peigne comme moyen de pré-scan pour un test de susceptibilité CW, notamment pour estimer le niveau moyen de susceptibilité sur une bande de fréquence donnée, nécessite de vérifier au préalable l'équivalence entre les résultats fournis par les essais d'injection CW et large bande. Cette question est primordiale dans le cas de la perturbation d'un circuit non linéaire, où l'injection d'une perturbation sinusoïdale conduira à la génération de multiples harmoniques qui pourraient se mélanger. Le théorème de superposition ne s'appliquant plus, on peut se demander si la réponse à la superposition de plusieurs harmoniques injectées en entrée d'un circuit est équivalente à la somme des réponses individuelles à chacune de ces harmoniques. Il faut souligner que cette équivalence n'est pas acquise, comme l'exemple présenté dans [4], et mérite donc d'être vérifiée sur le cas étudié.

Dans cet article, nous proposons de tester la susceptibilité d'un circuit de type référence bandgap (LT1798 de Linear Technology), qui délivre une tension de référence de 2.5 V sous une alimentation de 5 V. Un test de susceptibilité conduite est réalisé sur la broche d'entrée, selon le standard IEC62132-4 [6], pour rapidement comparer et corréler les résultats de test en perturbation CW et large bande. Soumis à une perturbation EM, un offset de tension apparaît en sortie. Le circuit est considéré comme défaillant dès que l'offset dépasse 20 mV. La susceptibilité est testée entre 10 MHz et 1 GHz, avec une puissance incidente maximale fixée à 33 dBm. La Fig.4 présente le seuil de susceptibilité mesuré en injection CW. Le circuit est très peu susceptible en-dessous de 100 MHz, mais présente une vulnérabilité marquée autour de 300 MHz.

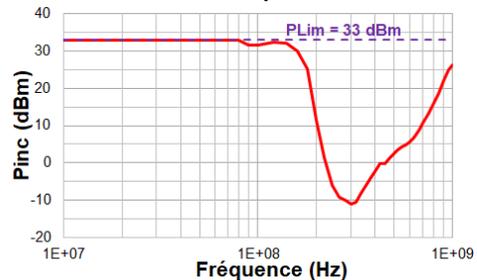


Fig.4. Seuil de susceptibilité conduite à une perturbation harmonique de la référence de tension

Le test est refait en insérant le générateur de peigne entre le synthétiseur de puissance et l'amplificateur de puissance, selon différentes configurations : le générateur de peigne est excité à 5, 10 et 20 MHz. Les essais sont aussi réalisés en plaçant un filtre passe-bas de fréquence de coupure 100 MHz (MiniCircuit VLF-50+), ou un filtre passe-haut de fréquence de coupure 120 MHz (MiniCircuit SHP-150+). Les résultats sont résumés sur la Fig.5. Des défaillances sont observées dans toutes les configurations, sauf celle avec un filtre passe-bas. De plus, les niveaux de susceptibilité sont quasi-identiques lorsque la perturbation couvre les bandes 10-1000 MHz et 120-1000 MHz. Ce résultat est en accord avec le seuil de susceptibilité sous perturbation CW, montrant une très faible susceptibilité sur la bande 10-150 MHz. Les deux graphes de gauche présentent les seuils de susceptibilité exprimés sous la forme de $P_{\text{harmonic BW}}$ ou P_{moy} . Les résultats montrent que la défaillance apparaît pour la même puissance moyenne quelle que soit la fréquence d'excitation, alors que $P_{\text{harmonic BW}}$ requis pour induire un défaut augmente de 3 dB quand on double la fréquence d'excitation (N est divisé par 2). La défaillance apparaît donc sous une puissance d'excitation moyenne constante. Pour vérifier l'équivalence entre les résultats en injections CW et large bande sur cette référence bandgap, nous testons l'application du théorème de superposition. S'il se vérifie, la défaillance est le résultat de la superposition des différentes harmoniques composant le signal de perturbation. Pour cela, nous introduisons le coefficient d'interférence I [7], donné par (5), où E_i est l'amplitude de l'harmonique de rang i composant la perturbation et S_i le seuil de susceptibilité du DST à la fréquence F_i . L'impact d'une harmonique sur la

génération du défaut est pondéré par le niveau de susceptibilité CW du DST à cette fréquence. Dans le cas

où le théorème de superposition s'applique, la défaillance apparaît dès que $I \geq 1$.

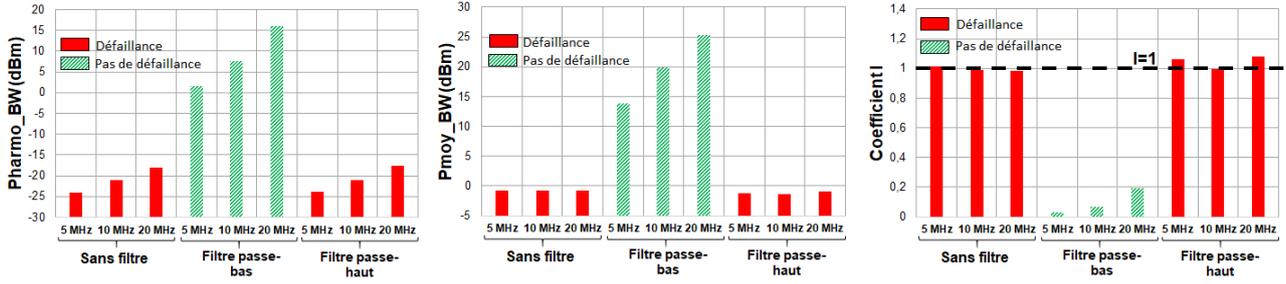


Fig.5. Seuil de susceptibilité conduite à une perturbation large bande de la référence de tension

$$I = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{S_i} \quad (5)$$

Comme l'indique la colonne de droite de la Fig.5, les défaillances apparaissent lorsque le coefficient I est proche de 1, quelle que soit la fréquence d'excitation. Dans le cas du filtre passe-bas, aucun offset n'est visible et le coefficient I est largement plus petit que 1. Ce résultat montre que le théorème de superposition peut s'appliquer dans la génération du défaut observé sur ce composant. En outre, bien que l'injection large bande ne permette pas de retrouver exactement le seuil de susceptibilité CW, ce résultat fournit aussi un moyen de l'estimer. L'amplitude des harmoniques produites par le générateur de peigne étant supposée constante et égale à $P_{\text{harmoni}}_{\text{BW}}$, le seuil d'immunité minimale du DST en injection CW $P_{\text{immun_min}}$ est bornée par deux situations extrêmes :

- $P_{\text{immun_min}} = P_{\text{harmoni}}_{\text{BW}}$ si le DST présente une susceptibilité accrue sur une bande très étroite, de largeur égale à la fréquence fondamentale de l'excitation.
- $P_{\text{immun_min}} = P_{\text{moy}}_{\text{BW}}$, si le DST présente un seuil de susceptibilité constant sur la bande de fréquence couverte par le générateur de peigne.

Ainsi, le résultat du test large bande avec un filtre passe-haut et une fréquence d'excitation de 10 MHz montre que le seuil d'immunité minimum sur la bande 120-1000 MHz est compris entre -21 et -1.5 dBm. Cette plage est en accord avec le seuil d'immunité CW minimum mesuré à -11 dBm à 300 MHz. De même, celui sur la bande 10-100 MHz doit être supérieur à une limite comprise entre 16 et 25 dBm, ce qui est cohérent avec le résultat d'injection CW.

VI. MISE EN ŒUVRE DU PRESCAN

Le générateur de peigne est maintenant testé dans le cas d'un essai NFSI, pour vérifier sa capacité à identifier rapidement les zones de vulnérabilité, mais aussi les bandes de fréquences d'intérêt et une première estimation du seuil de susceptibilité en injection CW. La référence de tension LT1798 est réutilisée. Un scan en champ magnétique tangentiel est réalisé. La sonde d'injection est placée à 2 mm au-dessus de la carte de test et parcourt une zone de 14×10 mm centrée sur le LT1798. Le pas de scan

est de 2 mm le long de l'axe X et 1 mm le long de l'axe Y, conduisant à 88 points spatiaux. Le test est réalisé à l'aide de l'amplificateur de puissance TESEQ-1G-070, de 48 dB de gain et délivrant des puissances moyenne et crête maximales de 49 et 52 dBm entre 10 et 1000 MHz.

VI.1. Injection harmonique

L'essai a été réalisé dans un premier temps en injection CW sur 28 points fréquences : de 10 à 90 MHz par pas de 10 MHz, puis de 100 MHz à 1 GHz par pas de 50 MHz. La recherche du seuil de défaillance est faite avec une puissance incidente comprise entre 10 et 36 dBm augmentant par pas de 2 dB. Une description plus détaillée de cet essai peut être trouvée dans [3], qui indique qu'une injection sous 32 dBm est suffisante pour estimer l'immunité de ce composant sous une onde plane de 1000 V/m d'amplitude.

La Fig.6 présente trois cartographies d'immunité en champ proche du composant à trois fréquences différentes. Elles indiquent des zones de forte susceptibilité au-dessus des broches d'entrée, de sortie et de masse du LT1798, dont la répartition spatiale évolue avec la fréquence. Quelle que soit la fréquence et le point d'injection, la défaillance est liée à la génération d'un offset négatif en sortie. La Fig.7 à gauche présente le seuil d'immunité au point de plus forte susceptibilité. Le résultat indique que le composant est susceptible principalement sur la bande 100 – 1000 MHz, avec une sensibilité plus marquée autour de 300 MHz. La réalisation du scan complet requiert 31993 itérations, soit près de 27 h. A l'issue du test, il apparaît que la mesure détaillée sur la bande 10-100 MHz n'était pas utile puisque le composant ne présente pas de sensibilité majeure. En outre, aucune défaillance n'est enregistrée pour un grand nombre de points. Pour l'illustrer, la Fig.7 à droite présente la cartographie du niveau d'immunité minimale du circuit. Cette cartographie indique pour chaque point l'excitation minimale de la sonde pour induire une défaillance quelle que soit la fréquence testée. Ainsi, aucune défaillance n'est observée pour une puissance inférieure à 32 dBm sur 27 points, et sur 59 points pour une puissance inférieure à 25 dBm. L'identification préalable des points et des bandes de fréquence pour lesquels le composant n'est pas susceptible aurait permis un gain de temps considérable.

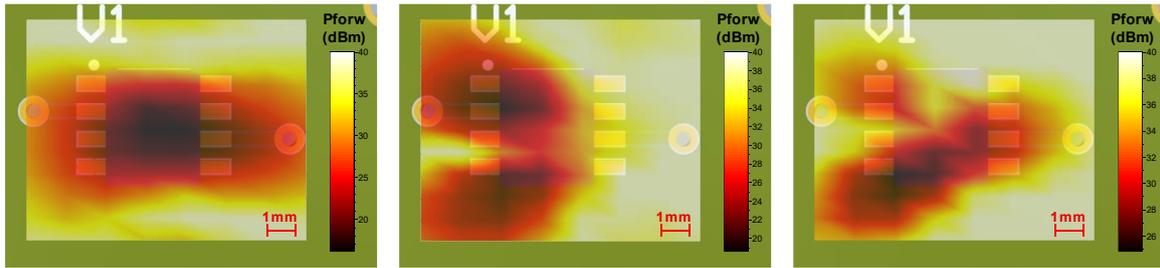


Fig.6. Cartographie de l'immunité champ proche du LT1798 – Injection harmonique à : 300 MHz (gauche), 600 MHz (centre), 1 GHz (droite)

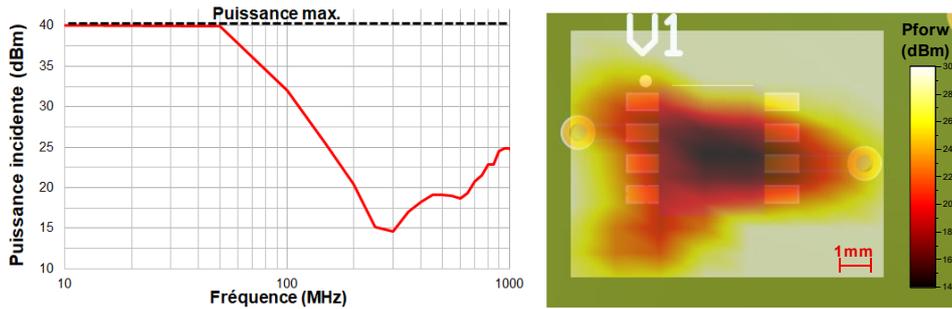


Fig.7. Seuil d'immunité champ proche du LT1798 en injection harmonique mesuré au point le plus sensible du circuit (gauche) – Cartographie de l'immunité minimum du circuit (droite)

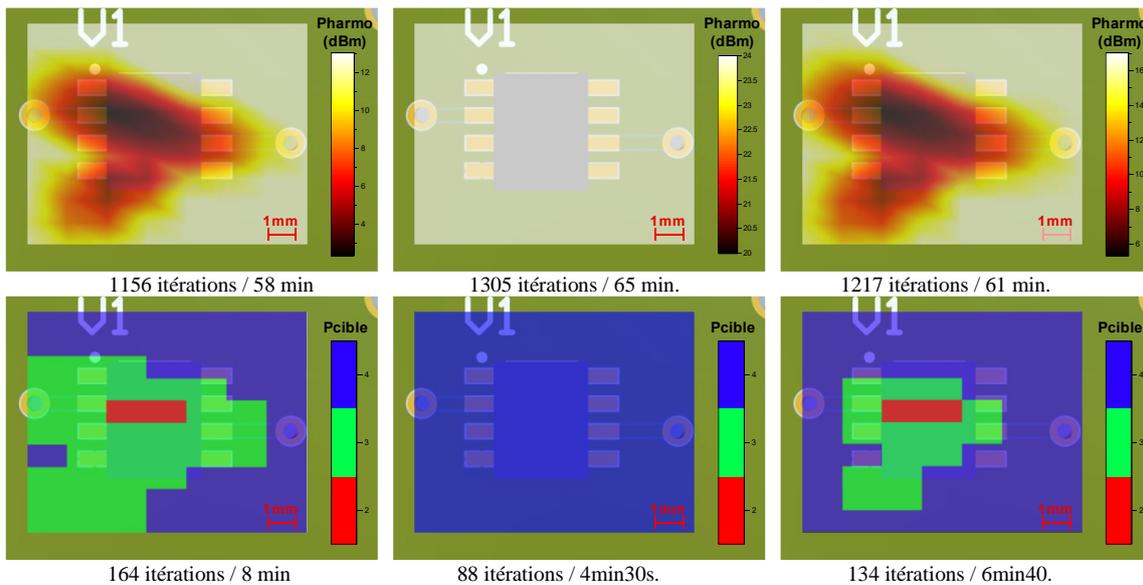


Fig.8. Cartographie de l'immunité champ proche du LT1798 en injection large bande : seuil de susceptibilité (ligne du haut), tenue à un niveau cible (ligne du bas) – Configurations 1 (gauche), 2 (centre), 3 (droite)

VI.2. Injection large bande

Dans un second temps, des essais en injection large bande ont été réalisés, selon trois configurations :

- Configuration 1 : la fréquence d'excitation du générateur de peigne est de 10 MHz, sans filtre de sortie. Le signal émis en sortie d'amplificateur couvre la bande 10 – 1000 MHz (N=101 harmoniques). La puissance moyenne par harmonique maximale est de 13 dBm.
- Configuration 2 : un filtre passe-bas coupant à 100 MHz est placée en sortie du générateur de peigne. Le

signal émis en sortie d'amplificateur couvre la bande 10 – 100 MHz (N=10 harmoniques). La puissance moyenne par harmonique maximale est de 24 dBm.

- Configuration 3 : un filtre passe-haut coupant à 120 MHz est placée en sortie du générateur de peigne. La fréquence d'excitation est réglée à 20 MHz. Le signal émis en sortie d'amplificateur couvre la bande 120 – 1000 MHz (N=45 harmoniques). La puissance moyenne par harmonique maximale est de 17 dBm.

Les essais sont réalisés selon deux modes différents :

- Recherche de seuil de susceptibilité précise : la puissance de sortie est incrémentée par pas de 2 dB jusqu'à la puissance maximale. Pour les 3 configurations, 15 points de puissance sont réglés.
- Recherche de la tenue à un niveau cible : le composant est testé sous 3 niveaux de puissance, séparés de 10 dB. Par exemple, dans la configuration 1, si le composant supporte le niveau de puissance maximal (12 dBm), le niveau cible 4 est attribué au point testé. S'il est susceptible pour un niveau de puissance compris entre 2 et 12 dBm, son niveau cible est de 3 ... Ainsi, pour chaque position de test, jusqu'à 3 niveaux de puissance sont testés.

La première ligne de la Fig.8 présente les cartographies de seuil de susceptibilité du LT1798 pour les 3 configurations, exprimées en puissance moyenne par harmonique. Le nombre d'itérations et la durée des essais sont ajoutées sous les cartographies. Aucune défaillance n'est enregistrée en configuration 2, indiquant l'absence de défaillance sur la bande 10-100 MHz en-dessous d'une puissance incidente moyenne comprise entre 24 et 34 dBm en injection CW. Cette estimation est cohérente avec le seuil de susceptibilité présentée à la Fig.7. Les cartographies produites à l'issue des configurations 1 et 3 sont très similaires et permettent d'identifier les trois broches sensibles du LT1798. Elles sont très similaires à la cartographie d'immunité CW minimum, présentée sur la Fig.7 de droite. L'écart entre les niveaux d'immunité est de l'ordre de 3 dB, qui s'explique par le rapport proche de 2 entre le nombre de fréquences testées. Dans la configuration 3, la puissance minimale pour induire un défaut est de l'ordre de 5 dBm par harmonique. On peut estimer que le niveau d'immunité minimum en injection CW est compris entre 5 et 21.5 dBm sur la bande 120-1000 MHz, ce qui est accord avec le seuil présenté sur la Fig.7. La durée des essais en mode de recherche de seuil est de l'ordre d'une heure, ce qui représente un gain de temps majeur par rapport aux essais CW. La seconde ligne de la Fig.8 présente les cartographies de la tenue du LT1798 aux niveaux cibles pour les 3 configurations. Ce mode de recherche permet de repérer plus facilement les points les plus sensibles de la zone à scanner, puisque la durée de ces essais ne dépasse pas 8 minutes.

Plutôt que de réaliser uniquement l'essai en configuration 1, qui test toute la bande 10-1000 MHz, il est plus avantageux de tester les configurations 2 et 3 pour mieux cibler les configurations d'un test en injection CW. La durée totale de l'essai est de l'ordre de 11 minutes, mais il permet d'éliminer l'analyse sur la bande 10-100MHz, sur laquelle le LT1798 ne présente pas de susceptibilité marquée. En ne réalisant les essais d'injection CW que sur les points d'intérêt repérés par l'injection large bande (par exemple, les points de niveau cible 2 et 3, soit 23 points sur 88) et en démarrant la recherche de puissance à 14 dBm, des cartographies précises des seuils de susceptibilité seraient obtenues après 3600 itérations, soit 3 h de test, soit une division par un facteur 9 de la durée totale de l'essai par injection CW complet. Une sélection

plus stricte des points d'intérêt permettrait de réduire davantage le temps de mesure en injection CW.

VII. CONCLUSION

Afin d'accélérer le NFSI, l'article a présenté une approche de pré-scan basée sur un générateur de peigne. Celui-ci permet d'identifier rapidement les points et fréquences d'intérêt et de fournir une première estimation du niveau de susceptibilité avant le scan final en régime harmonique. Le nombre d'itérations requises lors du NFSI en injection CW pour diagnostiquer complètement l'immunité rayonnée d'une carte électronique peut ainsi être réduit. Son utilisation nécessite une caractérisation préalable, pour connaître l'occupation spectrale et déterminer la configuration qui optimisera la puissance maximale d'injection sans risque de saturation de l'amplificateur de puissance. Dans le cas d'un scan sur une large surface (carte entière), la durée du pré-scan pourrait devenir importante. Des méthodes avancées de sélection de points pourraient être couplées au pré-scan pour limiter davantage le nombre de positions à scanner, comme les méthodes de scan adaptatif présentées dans [8].

REFERENCES

- [1] IEC TS 62132-9, IC – Measurement of electromagnetic immunity – Part 9: Measurement of radiated immunity – Surface scan method, IEC, 2014.
- [2] A. Boyer, N. Nohier, F. Caignet, S. Ben Dhia, "On the Correlation between Near-Field Scan Immunity and Radiated Immunity at Printed Circuit Board Level - Part I", IEEE Trans. on EMC, vol. 64, no. 2, pp. 1230-1242, 10.1109/TEMC.2022.3169183.
- [3] A. Boyer, N. Nohier, F. Caignet, S. Ben Dhia, "On the Correlation between Near-Field Scan Immunity and Radiated Immunity at Printed Circuit Board Level - Part II", IEEE Trans. on EMC, vol. 64, no. 5, pp. 1493-1505, Oct. 2022.
- [4] Q. M. Khan et al., "Experimental Characterization of Multitone EM Immunity of Integrated Oscillators Under Thermal Stress", IEEE Access, vol. 10, Aug. 2022, 10.1109/ACCESS.2022.3197659.
- [5] TBCG2 Comb Generator/Frequency Multiplier, Tekbox, www.tekbox.com.
- [6] IEC62132-4, IC– Measurement of electromagnetic immunity – Part 9: Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz - Part 4: Direct RF power injection method, IEC, 2014.
- [7] A. Boyer, "Méthode de prédiction de la compatibilité électromagnétique des systèmes en boîtier", Thèse de doctorat, INSA Toulouse, France, 2007.
- [8] S. Serpaud, A. Boyer, S. Ben Dhia, F. Coccetti, "Fast and Accurate Near-Field Measurement Method Using Sequential Spatial Adaptive Sampling (SSAS) Algorithm", IEEE Trans. on EMC, vol. 63, no. 3, pp. 858-869, June 2021, 10.1109/TEMC.2020.3025547.