

# ETUDE PARAMETRIQUE DU COUPLAGE DE MICRO-ONDES SUR DES PISTES ELECTRONIQUES

Jean-Christophe JOLY<sup>(1)</sup>, Bernard PECQUEUX<sup>(1)</sup>, Yannick BENIGUEL<sup>(2)</sup>, Didier ASFAUX<sup>(2)</sup>, Alain REINEIX<sup>(3)</sup>, Christophe GUIFFAUT<sup>(3)</sup>

(1) DGA / Centre d'Etude de Gramat  
(2) Société IEEA Courbevoie / Gramat  
(3) XLIM Limoges

## I. INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse de la vulnérabilité des systèmes électroniques aux agressions électromagnétiques de fréquence micro-onde. Depuis le milieu des années 80, le Centre d'Etudes de Gramat est responsable de l'étude de cette nouvelle menace : de nombreux moyens expérimentaux et numériques sont donc mis en œuvre pour en estimer les effets.

Que la méthode d'analyse de vulnérabilité soit «top down » (c'est à dire du système vers le composant) ou «bottom up » (du composant vers le système)», la compréhension du couplage de l'onde sur les pistes des cartes électroniques est indispensable.

Le couplage sur les pistes dépend d'un nombre très important de paramètres :

- Elévation / polarisation et azimut du champ incident
- Longueur des pistes
- Largeur des pistes
- Nombre de couches de pistes
- Charge en bout de piste
- Proximité des pistes
- Effet des coudes
- ...

De nombreux paramètres dépendent de la technologie de la carte. En effet, l'intégration croissante de composants électroniques sur une surface de plus en plus réduite implique d'une manière générale le recourt aux multicouches et aux pistes de petites dimensions. Par ailleurs, sur une même carte, ces paramètres (par exemple la longueur) peuvent aussi varier.

Ce papier présentent donc les études menées pour comprendre l'influence de divers paramètres sur le niveau de couplage reçu par le composant en bout de piste. La seconde partie de l'étude concernant la vulnérabilité des composants ou des fonctions qu'ils réalisent est traitées par ailleurs [1] [2].

## II. APPROCHE DETERMINISTE SUR UNE PISTE REELE

La susceptibilité de divers systèmes génériques a été étudiée au CEG dans de nombreuses configurations et lors d'illuminations par des formes d'onde diverses (formes fréquence, taux de répétition...) A plusieurs reprises, ces mesures expérimentales ont mis en évidence un phénomène de reset lors de l'illumination. Par conséquent et dans un premier temps, la piste de reset est choisie en raison de son importance pour la susceptibilité de la carte. En outre, cette piste est généralement longue car elle doit être connectée à plusieurs composants, ce qui favorise le couplage (Cf Figure 1).

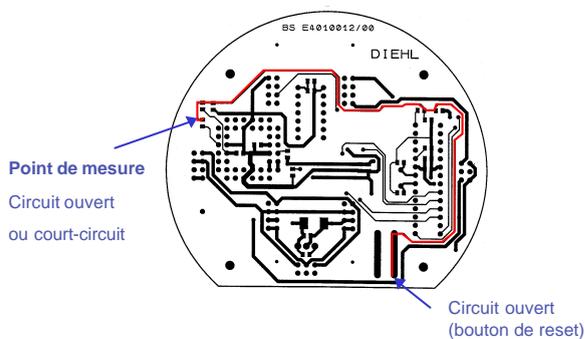


Figure 1 : carte et piste de reset étudiées

La piste étudiée est située à 1 mm au dessus d'un plan de masse continu. La largeur de la piste est aussi 1 mm. Pour simplifier les maillages, la piste est modélisée avec le code DFDT par un fil. La relation permettant la correspondance piste-fil est donnée ci-après.

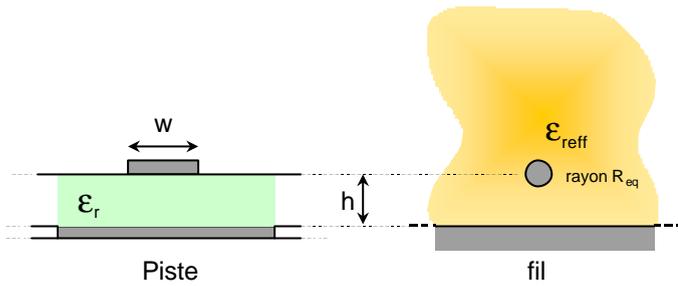


Figure 2 : correspondance piste-fil

Le couplage en bout de piste est égal au couplage à l'extrémité du fil de rayon équivalent :

$$R_{eq} = 2 \cdot h \cdot e^{-\frac{Z_c \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}}{60}}$$

Circulant dans un milieu de permittivité relative effective

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}$$

Sachant que l'impédance caractéristique  $Z_c$  de la piste est :

$$Z_c = \frac{Z_0}{2p \sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)$$

A l'extrémité de la ligne, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert sont successivement mesurés. Les résultats sont normalisés par rapport au champ incident et présentés sur la Figure 3

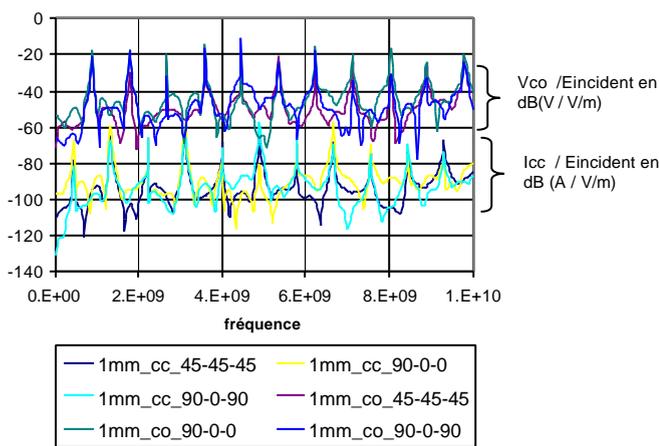


Figure 3 : fonctions de transfert de couplage de courants de court-circuit et de tension de circuit ouvert pour différentes incidences (élévation-polarisation-azimut).

La Figure 3 permet d'observer quelques phénomènes :

- les résonances de la fonction de transfert du  $V_{co}$  sont bien en  $n \cdot \lambda/4$  et celles du  $I_{cc}$  en  $(n+1) \cdot \lambda/2$ , malgré les coudes formés par la piste

- Aux anti-résonances,  $V_{co} = -60 \text{ dB(V)}$  et  $I_{cc} = -100 \text{ dB(A)}$  (soit  $V_{co} = 30 \text{ mV}$  et  $I_{cc} = 10 \mu\text{A}$ ) pour  $E_{incident} = 1 \text{ V/m}$ .
- Aux résonances,  $V_{co} = -30 \text{ dB(V)}$  et  $I_{cc} = -60 \text{ dB(A)}$  (soit  $V_{co} = 0,1 \text{ V}$  et  $I_{cc} = 1 \text{ mA}$ ) pour  $E_{incident} = 1 \text{ V/m}$ .

- Ces niveaux de couplage varient peu suivant les différentes incidences.

### III. ETUDE PARAMETRIQUE SUR DES PISTES DE LONGUEURS VARIABLES

Dans un deuxième temps, une série de simulations est lancée pour des pistes droites de longueurs variables afin de vérifier si les résultats précédents peuvent être généralisés.

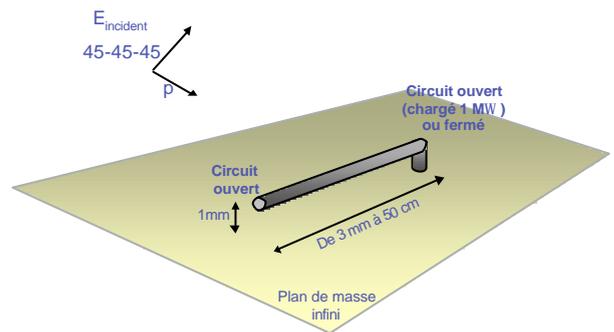


Figure 4 : couplage sur des pistes de longueurs variables (de 3 mm à 50 cm)

Les fonctions de transfert des courants de court-circuit pour différentes longueurs sont présentées Figure 5.

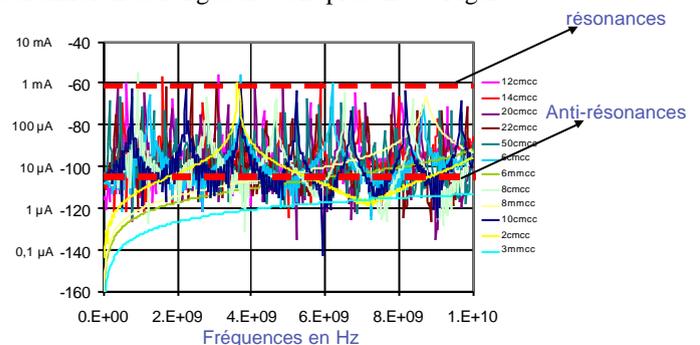
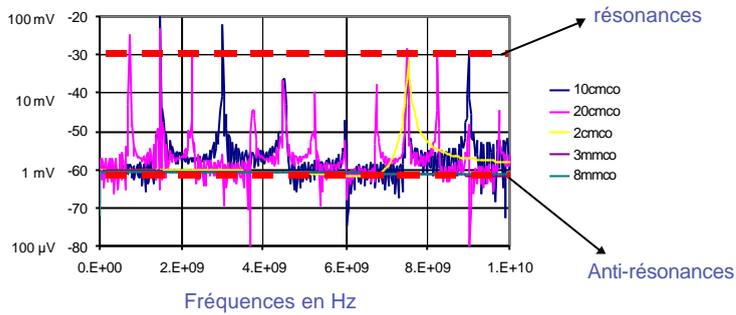


Figure 5 : Fonction de transfert :  $I_{cc}$  (en dB(A) /  $E_{incident}$  (en dB(V/m))

De même, les fonctions de transfert des tensions de circuit ouvert pour différentes longueurs sont présentées Figure 6.



**Figure 6 : Fonctions de transfert :  $V_{co}$  (en dBV) /  $E_{incident}$  (en V/m)**

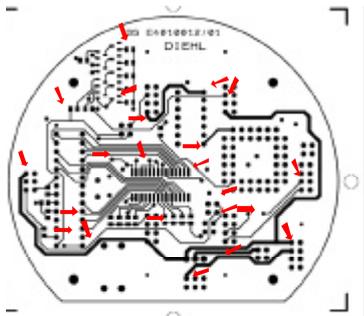
Ces courbes montrent que quels soient les longueurs, les niveaux de couplage aux fréquences de résonance (respectivement aux fréquence d’anti-résonance) sont similaires entre eux et avec les résultats obtenus avec la piste de reset au § II.

Seul le seuil de  $-100$  dB aux basses fréquences en court-circuit n’est pas respecté pour les pistes de longueurs inférieures au centimètre en raison de leurs résonances à des fréquences élevées.

Il est à noter que ces résultats ont été vérifiés avec un code utilisant les équations de Vance particulièrement adaptées au couplage sur des lignes [3].

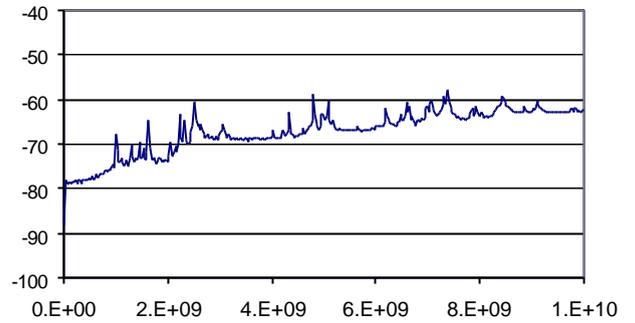
#### IV. APPROCHE STATISTIQUE SUR UNE CARTE REELLE

Une moyenne du couplage sur toutes les pistes (de longueurs différentes) de la carte de la Figure 1 est calculée (Cf Figure 7).

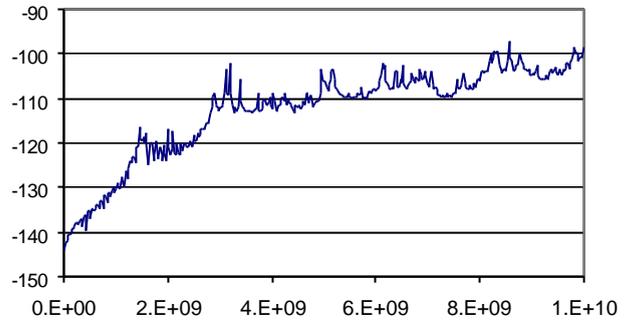


**Figure 7 : mesures de  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  sur une centaine d’extrémités de pistes**

Les résultats de couplage sont représentés sur la Figure 8 et la Figure 9.



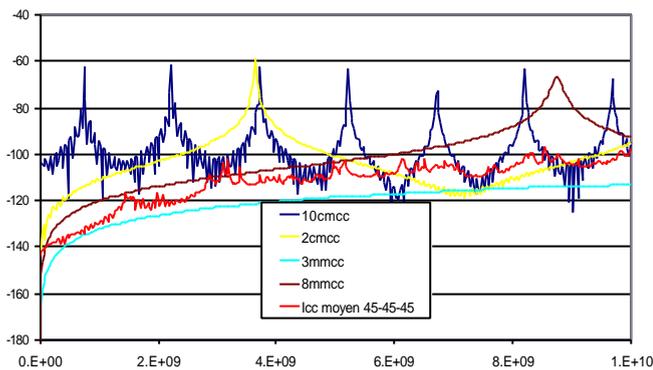
**Figure 8 : fonction de transfert  $V_{co}/E_{incident}$  en dB**



**Figure 9 : fonction de transfert  $I_{cc}/E_{incident}$  en dB**

Les résultats de la Figure 8 et la Figure 9 permettent de retrouver les seuils à  $-60$  dB et  $-100$  dB. Les niveaux sont néanmoins bien plus faibles en basses fréquences, comme sur la Figure 5 pour les pistes les plus courtes.

Il est intéressant de relier ces niveaux de courant ou de tension moyennés au courant ou à la tension obtenue sur une piste dont la longueur est la moyenne des longueurs de pistes. Le mailleur automatique de Gorf indique que la longueur moyenne des pistes de la carte de la Figure 7 est **5 mm**. On observe alors que le courant moyen est similaire au courant sur une piste de longueur moyenne (ici le  $I_{cc}$  moyen (5mm) est bien compris entre les fonctions de transfert d'une piste de 3 mm et d'une piste de 8mm). (Cf Figure 10).



**Figure 10 : le  $I_{cc}$  moyen sur toute les pistes est similaire au  $I_{cc}$  sur une piste de longueur moyenne.**

## CONCLUSION

Cette étude sur le couplage sur des pistes privilégie le paramètre longueur.

Au prix d'un écart-type important, les résultats de simulation numérique permettent d'estimer un niveau de couplage.

Pour 1 V/m incident, aux résonance, on obtient  $V_{co}=30$  mV et  $I_{cc}=1$ mA ; aux anti-résonance,  $V_{co}=1$ mV et  $I_{cc}=10\mu$ A.

Cette étude montre par ailleurs que lors d'une approche statistique, la connaissance de la longueur moyenne des pistes (certainement liée à l'intégration donc à la génération de l'électronique) est suffisante pour estimer le couplage moyen sur la carte.

Connaissant l'atténuation apportée par les coffrets et les porteurs, ainsi que la génération de l'électronique concernée, ces niveaux sont souvent suffisants pour garantir l'immunité d'un système ou d'une fonction. En cas de doute et de valeurs limites, une étude plus approfondie est néanmoins nécessaire.

Ces résultats seront intégrés dans le projet commun IRCOM-CEG « VULCAIN »

## REFERENCES

[1] «méthodologie d'analyse de la susceptibilité de cartes électroniques » Reineix A, Guiffaut C, Torres F, Pecqueux B, Joly JC, Hoffmann P, CEM 06

[2] «CESARE : un calculateur dédié à l'étude de la susceptibilité aux agressions électromagnétiques » Hoffmann P, Massarin S.

[3] « coupling to shielded cables » E.F. Vance Wiley Interscience, December 1977