

Modélisation de système pour la prédiction de défaillances dues aux décharges électrostatiques

Fabien Escudié, Fabrice Caignet, Nicolas Nolhier

▶ **To cite this version:**

Fabien Escudié, Fabrice Caignet, Nicolas Nolhier. Modélisation de système pour la prédiction de défaillances dues aux décharges électrostatiques. Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique (JNRDM 2016), May 2016, Toulouse, France. 5p. hal-01698411

HAL Id: hal-01698411
https://laas.hal.science/hal-01698411

Submitted on 1 Feb 2018

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.

Modélisation de système pour la prédiction de défaillances dues aux décharges électrostatiques.

F.Escudié, F.Caignet, N.Nohlier
Laboratoire LAAS-CNRS
7, Avenue du Colonel Roche
31400 Toulouse, France

E-mail : fescudie@laas.fr

Résumé

De par l'évolution des technologies des semi-conducteurs et la multiplication d'applications embarquées dans des environnements sévères, les défaillances induites par des décharges électrostatiques (ElectroStatic Discharges - ESD) deviennent une préoccupation majeure. Ces évènements transitoires de forte puissance peuvent provoquer la destruction du matériel ou induire des fautes logiques tout aussi critiques pour les applications où la sécurité des personnes est en jeu.

Le principal objectif est de définir et de valider une méthodologie comportementale de construction de modèle de circuits intégrés (CI), pour simuler l'impact des ESD dans un système. Ce travail se fait dans le cadre du groupe de normalisation WG26 de l'ESDA (ESD Association - "Models for System Level Simulations") qui travaille actuellement sur un standard afin de prédire l'impact des ESD dans un système. Sept laboratoires sont impliqués et travaillent en round robin pour valider une méthodologie.

1.Introduction

Prédire l'impact des ESD sur les systèmes est une nécessité pour garantir la fiabilité des systèmes embarqués. L'utilisation de modèles comportementaux de description des protections intégrés dans les composants présente le double avantage de permettre des simulations complexes liées au grand nombre de composants et au comportement fortement non-linéaire des protections [1]. Le deuxième avantage du modèle comportemental qui permet de garder un aspect dit « boite noire » du composant est de garantir la propriété intellectuelle des constructeurs en ne dévoilant pas la réalisation physique des protections intégrées.

Afin de valider les méthodes de génération de modèle (développées conjointement dans les groupes de normalisation ESDA et IEC (International Electrotechnique Committee) [2], le travail présenté est effectué sur trois systèmes disparates permettant d'étudier les applications numériques, automobiles et les applications de communication à grande vitesse.

La première partie du document (2) porte sur le setup de mesure choisit par le groupe ESDA pour étudier et extraire des courbes sur le comportement des protections ESD d'un composant. Dans la seconde partie (3), nous utilisons les courbes de mesure obtenues précédemment pour élaborer des modèles de simulation. Le composant jusqu'ici étudié seul est ensuite placé sur un PCB nous permettant de rajouter des éléments externes (capacité, TVS, …) afin d'observer en mesure comme en simulation l'impact de ces éléments rapportés (4) pour vérifier la validité de notre modèle. Le modèle quasi-statique ne suffit pas pour obtenir une bonne précision sur les transitoires des simulations dès qu'un élément externe est rajouté nous verrons dans la partie (5) et (6) comment réaliser un modèle plus précis en cours de validité dans la partie (7).

2.Setup de mesure

Pour la reproduction d'ESD, le groupe de travail s'est focalisé sur la décharge d'une ligne de transmission (Transmission Line Pulse - TLP). Le TLP est une injection de pulsation de courant contrôlé en temps de

montée, en largeur d'impulsion ainsi que son amplitude. La ligne de transmission étant 50Ω, le niveau de courant de l'impulsion est donné par le niveau de tension de charge de la ligne (ex : 100V/50Ω = 2A). La durée d'impulsion quant à elle, dépend de la longueur de la ligne. Le temps de monté et modulé par des filtres adaptés 50Ω placé à la sortie. Les laboratoires utilisent une impulsion de 100ns avec un temps de montée de 500ps à 2ns selon le modèle de TLP utilisé.

Le TLP est directement appliqué sur les broches du CI [3]. Le niveau d'injection est évolutif de 0V à 1000V par pas, avec une impulsion maximale de 20A. Pour chaque impulsion la tension et le courant sont mesurés, entre 70ns et 90ns, et constituent un point de la courbe I(V) du composant.

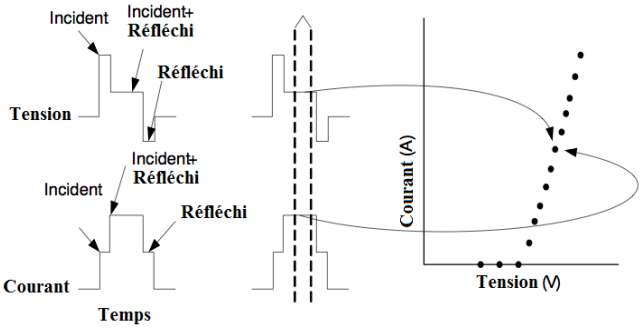


Figure 1. Mesure TLP et courbes I(V) associée

La courbe ainsi obtenue est une courbe I(V) traduisant le comportement d'une protections entre deux broches du CI.

Pour réaliser un modèle de composant, il faut tester toutes les broches susceptibles d'être soumis aux ESD. Pour l'application automobile, le composant LIN (Local Interconnect Network) est étudié [4], il dispose de 8 broches dont 3 soumises aux ESD (LIN/VSUP/GND). Ces broches sont donc testées par paire (LIN-GND, LIN-VSUP, VSUP-GND) en impulsion positive et négative. Quatre LIN de différents fabriquant sont testés, la figure 1 présente les courbes IV positive de la protection LIN-GND de chacun.

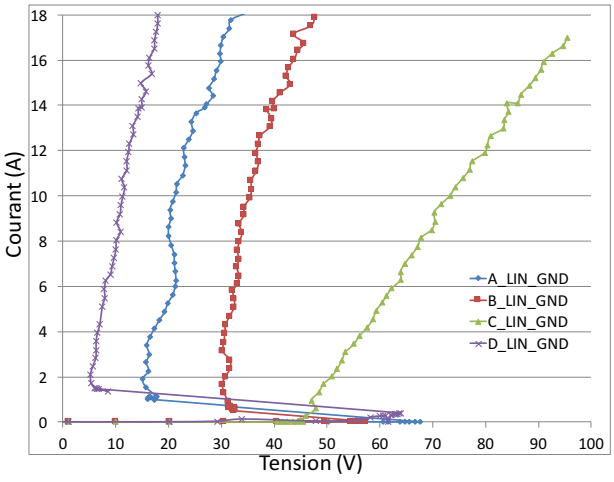


Figure 2. Courbes I(V) des protections LIN-GND pour différents fabricants.

Les résultats nous prouvent qu'il existe plusieurs stratégies de protection différentes. La méthodologie à appliquer devra donc être universelle et fonctionner pour tout type de protection.

2.1. Interprétation des résultats

La stratégie de protection est différente selon les constructeurs. Deux cas peuvent être observé figure 3 :

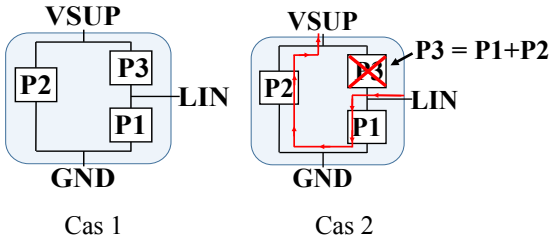


Figure 3. Différente stratégie de protection

Cas 1 : Le fabricant a prévu des protections entre chaque broche, auquel cas la mesure TLP nous donne les courbes IV correspondant au comportement de chaque protection.

Cas 2 : Il n'existe pas de protection directe entre deux broches. Le TLP nous donne une courbe IV entre ces deux broches qui sera le résultat de la somme des deux autres protections.

Il est donc nécessaire d'analyser les courbes I(V) obtenue pour chaque composant. Les résultats doivent être interprétés. Si une courbe I(V) est le résultat de la somme de deux autres courbes, alors le chemin de l'ESD n'est pas direct entre ces deux broches mais passe par les autres protections. Prenons pour exemple, les résultats de courbes I(V) pour le fabricant D figure 4.

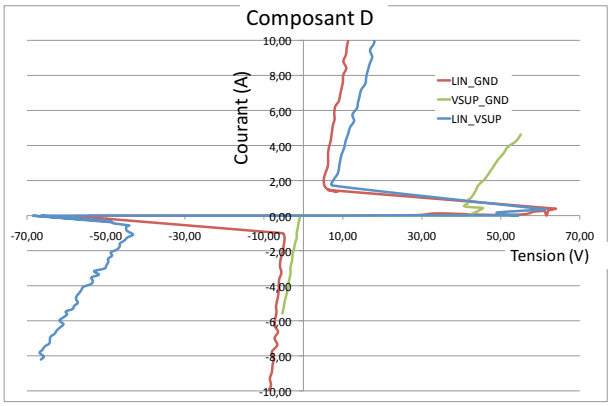


Figure 4. Courbes I(V) de toutes les protections du composant D

Après analyse des courbes, il est possible d'observer que la protection LIN_VSUP est égale à la somme des protections LIN_GND et GND_VSUP figure 5.

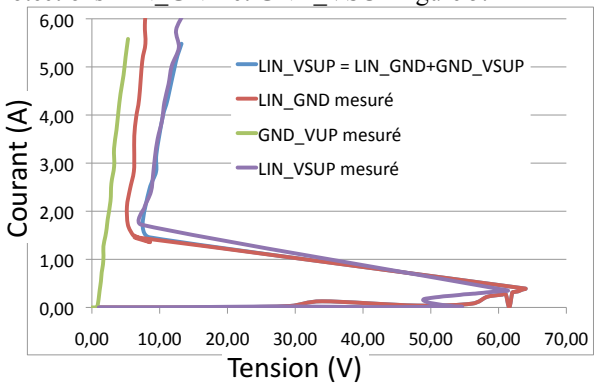
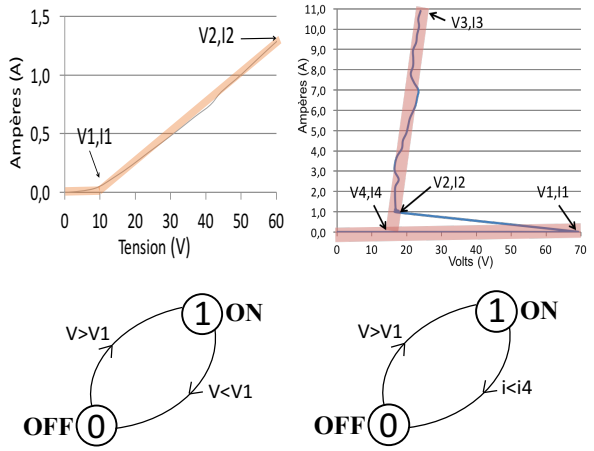


Figure 5. Analyse des courbes I(V) pour la protection LIN_VSUP

La stratégie de protection de ce composant fait donc partie du cas n°2. La mise en place du modèle comportemental doit donc tenir compte de cette structure de protection.

3.Génération de modèle

D'après les courbes obtenues nous observons deux types de protections, « linéaire » comme une courbe I(V) d'une diode et « non linéaire » des protections à retournement appeler aussi « snapback ». Les modèles réalisés sont sous forme de machine à état. Pour cela, les courbes I(V) sont découpés en segment de droite, chaque segment représente un état.



a) Protection « linéaire » b) Protection « non linéaire »

Figure 6. Linéarisation des courbes I(V) et machine à état associée

Chaque laboratoire est libre d'utiliser le langage et le simulateur de son choix. Cela nous permet d'avoir des modèles en VHDL-AMS, Verilog et Spice.

4.Mesure et simulation sur carte

Des cartes (PCB : Printed Circuit Board) ont été développées pour tester les composants dans des configurations systèmes clasiques. Elles possèdent un motif d'injection figure 7 permettant de moduler le chemin de l'ESD jusqu'au composant en introduisant des éléments sur les empreintes 1 à 5.

Le motif sert également aux mesures de tension (*SMA_CH3 via une résistance de* 500Ω sur l'empreinte 6) et courant (la mesure du courant est obtenue par mesure de champ proche à l'aide d'une sonde magnétique placée au-dessus de la ligne microstrip).

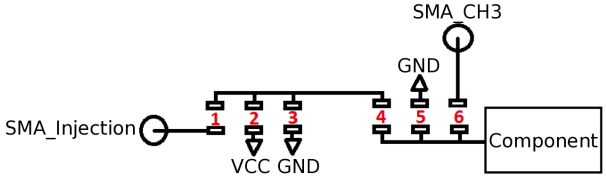


Figure 7. Motif d'injection disponible sur la carte

Dans cette étude, nous nous plaçons dans un premier temps en « injection directe » avec des résistances 0Ω sur les empreintes 1 et 4. Puis une capacité est rajoutée en parallèle du composant sur l'empreinte 3.

La simulation reprend tout le setup de mesure, elle inclut un modèle de générateur TLP, construit à base de ligne de transmission, le filtre de 1ns utilisé pour le temps de monté de l'impulsion [5], les pistes de la carte sous forme d'éléments LC distribués et les modèles haute fréquence des éléments passifs.

Les résultats de mesures et de simulations présentées (Fig. 8 : tension et Fig. 9 : courant), correspondent à une injection directe de 800V TLP sur la broche LIN vers GND pour le fabricant D (plus fort retournement).

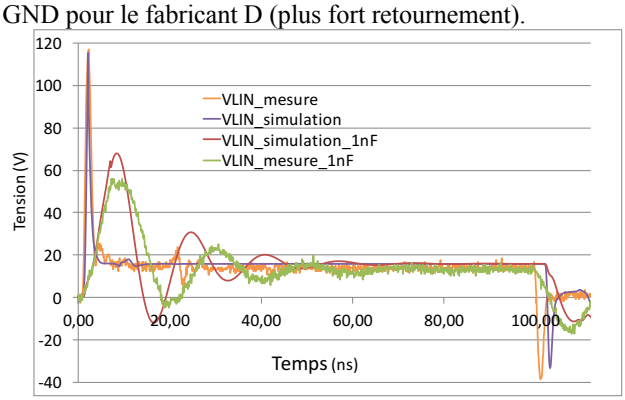


Figure 8. Comparaison mesure et simulation de la tension aux bornes du LIN avec et sans capacité pour une injection de 800V TLP

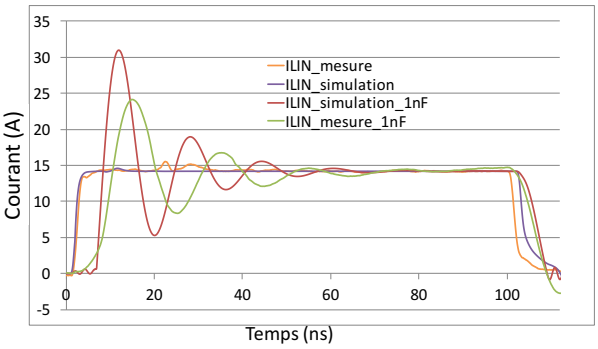


Figure 9. Comparaison mesure et simulation du courant à l'entrée de la broche LIN avec et sans capacité pour une injection de 800V TLP.

Les courbes de simulation de courant et de tension en injection directe sans élément externe sont similaires aux mesures. Les courbes de tension avec capacité de découplage, nous permettent d'observer dans un premier temps la charge de la capacité jusqu'au déclanchement de la structure de protection. Dès que la structure se retourne, nous constatons un pic de courant, dû à la charge accumulée dans la capacité plus le courant du TLP. Le courant qui traverse la protection est alors doublé (31A en simulation, 24A mesuré pour 14A injecté). Cette simulation présente une faible erreur relative sur le niveau quasi-statique. En ce qui concerne l'allure transitoire, nous remarquons des oscillations bien plus rapides et importantes en simulation. Cet exemple simple nous montre que les modèles ne peuvent se limiter à une mesure I(V) quasi-statique, mais que d'autres éléments agissent sur la dynamique.

5.Etude du comportement dynamique

La figure 10 reporte la mesure transitoire de la tension et du courant obtenue pour une injection de 100v TLP entre les broches LIN et GND pour le composant D.

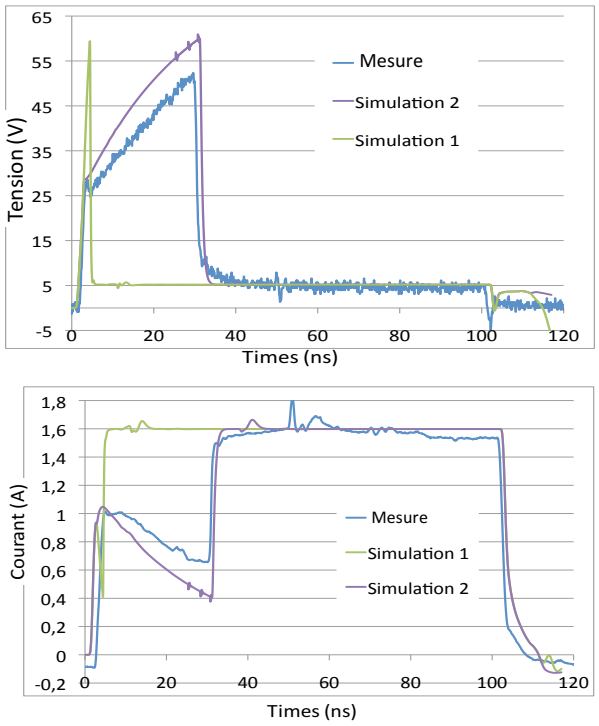


Figure 10 : Comparaison entre simulation et mesure de la tension et du courant pour une injection de 100v TLP entre LIN et GND (composant D)

La simulation quasi-statique donne une bonne corrélation pour la tension et le courant à 80ns. Cependant l'évolution lente de la tension entre 0 et 30ns n'est pas reproduite. Suivant la méthodologie classique pour la réalisation de modèle, la simulation n'est pas capable de prédire cet effet (fig.10– Simulation 1). Pour prendre en compte les effets transitoires dans la simulation, des paramètres doivent être rajoutés. Le prochain paragraphe décrit le moyen utilisé pour les extraire par la mesure.

6. Extraire les paramètres pour la simulation transitoire

La capacité des broches d'entrées et de sortie du composant est souvent ajoutée dans la simulation. Elle représente le temps pour atteindre la tension de déclenchement. Sa valeur peut être obtenue dans la datasheet du composant ou dans le modèle IBIS (I/O Buffer Information Specification). La plupart du temps elle est obtenue par la mesure VNA (Network Analyzer), soit par une analyse petit signal, ce qui voudrait dire que l'évolution de la tension avant déclenchement dépendrait de cet élément passif. Selon l'évolution de la tension obtenue figure 10, les éléments avant la tension de déclenchement sont non-linéaire. Dans ce cas nous supposons que cela ressemble à une « capacité non linéaire » (même si cela est l'effet d'une activation dans le composant) dont la valeur change pendant sa charge.

La prochaine étape est de trouver une solution pour extraire cette capacité non-linéaire. Nous réalisons une mesure à l'aide d'une capacité à haute précision (Type C0G) placée en parallèle du composant sur l'empreinte 3 de la figure 7. Cette capacité permet de ralentir la tension avant déclenchement pour obtenir la courbe I(V) figure 11.

Nous testons d'abord la capacité de 1nF pour être sûr de sa stabilité entre 0v et la tension de déclenchement du composant 70v.

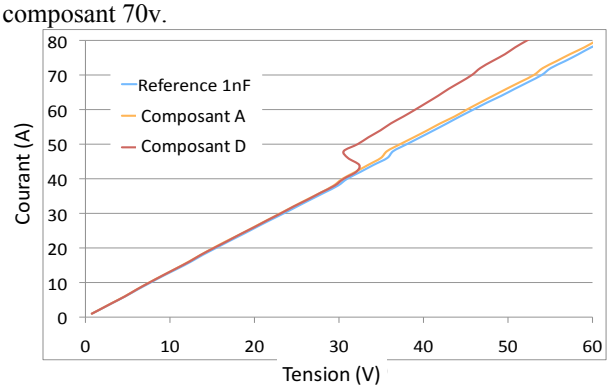


Figure 11 : courbe I(V) avant la tension de déclenchement de la protection LIN-GND.

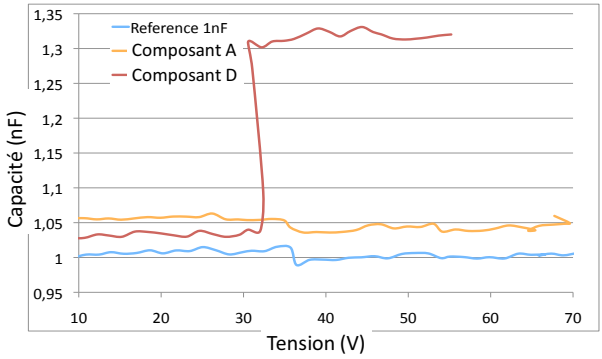


Figure 12 : Capacité équivalente pour la protection LIN_GND.

Le composant A suit la mesure de la capacité de 1 nF. Cela confirme que le comportement de la protection avant son déclenchement est purement capacitif. Le composant D a un changement de valeur à 32V ce qui représente une activation interne. La valeur de la capacité obtenue dans la figure 12 est obtenue par les formules de la capacité (1&2) appliqué sur les courbes de la figure 11.

$$uc(t) = E \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + Vini \times e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

$$c = -\frac{t}{R \times \ln(\frac{uc(t) - E}{Vini - E})} \quad (2)$$

Uc(t) est la tension dynamique, Vini est la tension de précharge de la capacité, E est la tension du TLP et τ la constante de temps du RC. La figure 12 est obtenue pour la tension TLP mesuré à 80ns et la tension initiale est de 0v. La capacité C est calculée en prenant R la résistance du système 50 Ω.

Nous trouvons à l'aide de cette méthode une capacité de 50pF pour le composant A entre les broches LIN et GND. Pour le composant D nous avons une capacité de 30pF de 0V à 30V puis une capacité de 300pF jusqu'au déclenchement de la protection. Si nous observons la courbe de la tension v(t) pour 80V TLP d'injection figure 13, le changement de pente de charge capacitive à 24V est visible.

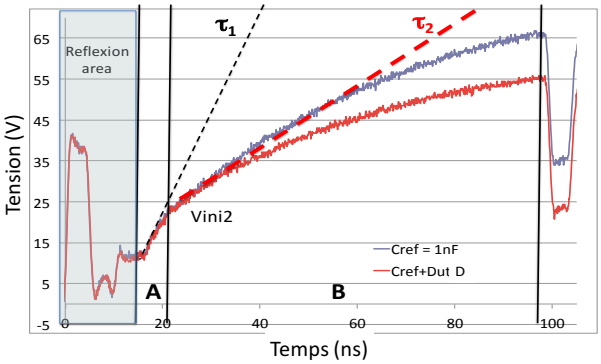


Figure 13 : Courbe v(t) de la protection LIN-GND à 80VTLP pour le composant D avec une capacité de 1nF en parallèle.

La capacité correspondant au τ1 calculée pour la zone A est de 30pF. Dans la zone B les 300pF obtenue était pour une tension initiale de 0v ce qui n'est pas correct. Après avoir réajusté la valeur de Vini dans l'équation (2) pour la zone B nous trouvons une capacité de 600pF. Une capacité variable comprenant ce comportement en fonction de la tension a été introduit en simulation figure 10 (simulation 2).

7. Le modèle en cours de validité

Le point principal de cette étude est de valider le modèle quelque soit les composant externes rajoutés. Même si le composant rajouté est une simple capacité de découplage, elle peut introduire des phénomènes complexes. La figure 14 reporte la mesure et la simulation avec et sans capacité de 1nF placé en parallèle de la protection LIN-GND pour le composant A, subissant une injection TLP de 100V. Dans cette simulation la capacité externe est modélisée par son modèle haute fréquence obtenue par mesure VNA. La capacité de 50pF trouvé dans la partie précédente est introduite dans le modèle du composant.

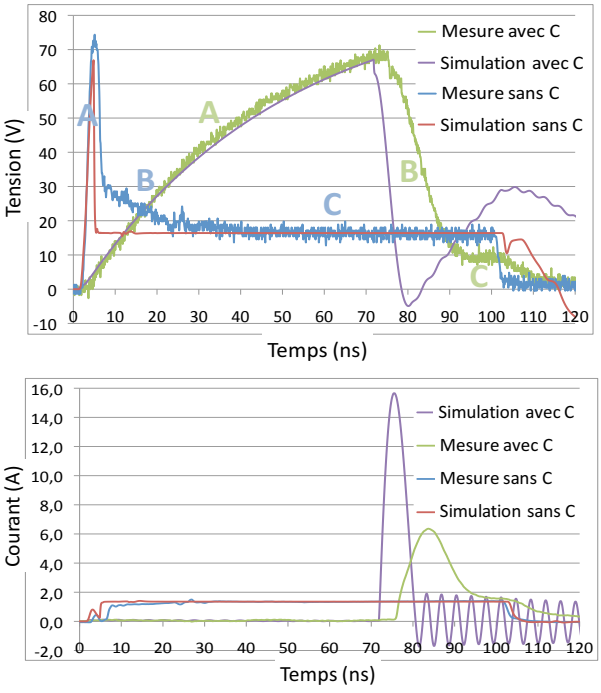


Figure 14 : Comparaison entre mesure et simulation de la tension et du courant pour la protection LIN-GND du composant A, 100V TLP d'injection.

Ces courbes peuvent être divisées en trois parties, la charge de la protection ESD avant d'atteindre la tension de déclenchement (A), le temps du déclenchement jusqu'au niveau stable (B) et le niveau quasi-statique (C). Durant la phase (A) et (C) les résultats de simulation sont corrects. Pour la phase (B) [6], un nouveau phénomène apparaît juste après la tension de déclenchement. La résistance obtenue après le déclenchement n'est pas identique à celle obtenue par la courbe I(V). En effet après le pic de tension, la simulation retourne directement à l'état stable se qui introduit un pic de courant plus important avec la capacité, tandis que la tension de la mesure décroit lentement de 30V à sa valeur stable à t=25ns. La méthode pour extraire ce paramètre est en cours de validation.

8.Conclusions

A ce jour il n'existe aucune méthode pour prédire l'impact d'un ESD dans un système. La méthodologie classique de construction de modèle comportemental des protections ESD d'un composant peut être satisfaisante pour réaliser des simulations à forte injection où le transitoire à un faible impact car peut visible. Cependant il ne nous permet pas d'avoir une bonne convergence entre simulation et mesure sur les allures transitoires à faible injection ou dès qu'un élément externe est rajouté. Pour remédier à ce problème la nouvelle méthodologie en cours de validité nous donne un modèle plus complexe et plus précis qui se divise en trois partie. Modèle de la capacité équivalente avant déclenchement, modèle de la mise en conduction et le niveau stable définie par la mesure quasi-statique.

Références

[1] N. Monnereau, F.Caignet, *et al.* "Investigation of Modeling System ESD Failure and Probability Using IBIS ESD Models ", IEEE Trans. On Device and Materials Reliability, Volume : 12 Issue : 4 Pages : 599-606, Dec. 2012

[2] Industry Council on ESD Target Levels, »White Paper 3 : System Level ESD Part 2 : Implementation of Effective ESD Robust Designs », 25 Sept. 2011

[3] J. Barth, *et al.* "TLP Calibration, Correlation, Standards, and New Techniques" in *Electrical Overstress Electrostatic Discharge Symposium Procedings, 2000 USA* ,pp.85-96, 26-28 Sep 2000

[4] Patrice Besse, Fréderic Lafon, Nicolas Monnereau, Fabrice Caignet, Jean Philippe Laine, Alain Salles, Sophie Rigour, Marise Bafleur, Nicolas Nolhier , David Trémouilles,"ESD system level characterization and modeling methods applied to a LIN transceiver ", 2011 EOS/ESD Symposium, pp. 329-337

[5] Y. Cao, *et al.* "Rise-Time Filter Design for Transmission-Line Pulse Measurement Systems," in *Microwave Conference, 2009 German* , vol., no., pp.1-5, 16-18 March 2009

[6] Kuo-Husuan Meng, E.Rosenbaum, *et al.* " Piecewise-Linear With Transient Relaxation for Circuit-Level ESD Simulation ", IEEE Trans. On Device and Materials Reliability, Volume : 15, 3 Sept. 2015