

Une approche éducative de la compatibilité électromagnétique des circuits intégrés

Etienne SICARD, Alexandre BOYER

INSA/DGEI - Université de Toulouse
31077 Toulouse - France

Etienne.sicard@insa-toulouse.fr

Alexandre.boyer@insa-toulouse.fr

<http://www.ic-emc.org>

Résumé— Cet article présente une expérience originale d'enseignement pratique de la compatibilité électromagnétique (CEM) au niveau des circuits intégrés. Après avoir posé le contexte spécifique de la CEM au niveau composant, nous donnons un aperçu des normes en vigueur, et détaillons les challenges en matière d'émission parasite et susceptibilité aux ondes radiofréquences. Nous décrivons la structure du cours proposé, ainsi que les outils et des travaux pratiques associés. L'expérience d'enseignement porte sur une période de 10 ans, en entreprises, en formation initiale et en formation continue. Nous évaluons l'impact du cours et des approches pratiques, démontrant l'intérêt de ce type de formation et d'approche.

Mots clé: CEM, circuits intégrés, émission parasite, susceptibilité aux agressions radiofréquences, IEC, IBIS, ICEM

I. Introduction

La compatibilité électromagnétique (CEM) des composants semble une préoccupation récente, en comparaison avec la CEM des systèmes et des équipements. Pourtant, les ancêtres de nos simulateurs de circuits électroniques tels que SPICE trouvent leur origine dans la prédiction de l'effet des radiations nucléaires sur les composants [1], avec dès 1965 des corrélations entre les simulations et les mesures expérimentales. La déclinaison des contraintes du niveau système vers le niveau composant (Fig. 1) est donc une préoccupation ancienne. Les bus et réseaux d'interconnexions du système jouent un rôle d'antenne émettrice ou réceptrice, les circuits intégrés actifs jouent le rôle de source mais aussi de victime. La CEM est donc par nature multi-niveaux et multi-échelles. Le numéro spécial de la revue IEEE EMC [2] en 1979 peut être vu comme le point de départ d'une thématique scientifique adressant successivement les problèmes d'immunité, d'émission, puis de modélisation de la CEM des composants. Les premières grandes synthèses et les premiers ouvrages intégrant une partie sur ce sujet sont publiés dans les années 1990, mais il faut attendre la publication de standards dédiés à la mesure CEM composants sous l'égide de l'IEC [3][4] en 1995, la naissance de la conférence EMC Compo [5] en 2000 pour parler d'une véritable reconnaissance de cette activité au niveau mondial.

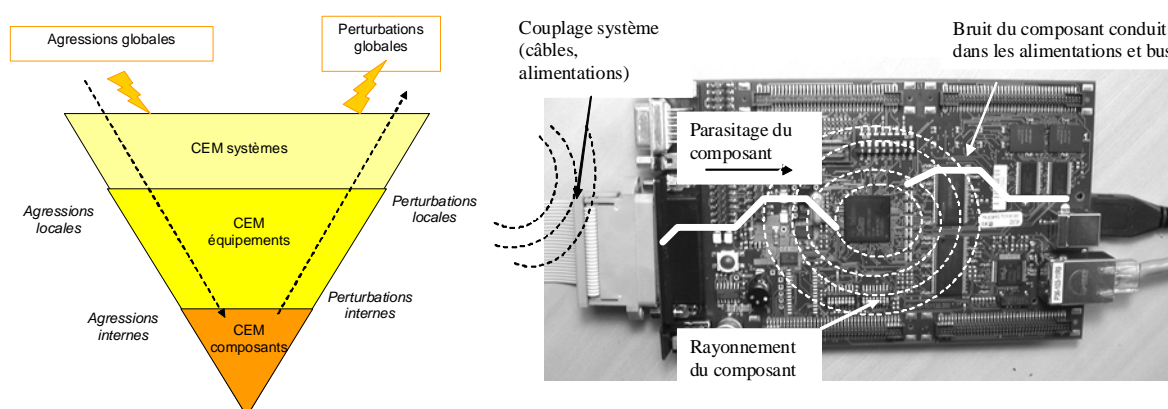


Figure 1 : La CEM composants est une déclinaison des contraintes CEM système au niveau des composants dans les équipements. Le composant est à la fois susceptible aux interférences conduites, rayonnées, mais aussi une source de bruit

L'enseignement de CEM au niveau systèmes a démarré il y a de nombreuses décennies, un exposé de la structure d'un cours orienté résolution de problèmes étant par exemple publié par M. Morris en 1969 [6]. De nombreux cours de CEM sur la base d'ouvrages de références tels que ceux de C. Paul [7] existent dans la plupart des formations de niveau ingénieur électronique. A l'opposé des contenus souvent très théoriques et difficilement applicable à la résolution de problèmes pratiques, on citera le remarquable travail de vulgarisation et de pédagogie de A. Charoy [8] aux éditions Dunod. Cependant, dans la plupart des ouvrages, la part dédiée aux composants est souvent restreinte, quand elle n'est pas nulle, à l'exception de la synthèse publiée en 2006 [9] focalisée sur l'état des connaissances en CEM des circuits intégrés. Un état de l'art du domaine a été publié dans [17] en 2009, 30 ans après le numéro visionnaire de la revue IEEE EMC précité [2].

II. La conception orientée CEM

La demande en formation spécifique CEM composants est née dans les années 1995, avec l'avènement des normes « CE », et le constat d'une grande dispersion de comportement CEM entre composants issus de fondeurs différents, en appliquant les mêmes méthodes de mesures normalisées [3,4]. Sans doute, les concepteurs de circuits intégrés Japonais ont occupé une place de leader sur les aspects de faible émission, en particulier pour les applications automobiles. Les autres pays ont alors cherché à rattraper leur retard dans les années 2000, notamment en Europe avec une succession de projets de recherche coopérative. On note aussi Plus récemment, l'ingénierie de la téléphonie mobile s'est aussi heurtée au problème de CEM composants, dans sa quête vers plus de miniaturisation et de cohabitation entre systèmes multifréquence hétérogènes.

La demande récurrente des ingénieurs de conception de systèmes intégrés est de disposer d'outils, de méthodes et de standards permettant une évaluation prédictive des performances du composant durant les itérations de design. Du côté utilisateurs de composants, la demande est aussi de plus en plus forte pour la mise à disposition de modèles permettant de prédire le comportement CEM au niveau sous-système électronique, dont l'une des clés est le modèle CEM au niveau composants. Les deux mondes étant assez cloisonnés, et les informations technologiques au niveau composant étant considérées généralement comme sensible et confidentielles, seuls des standards dans l'esprit de la norme IBIS [10] peuvent garantir une remontée fluide et fiable des informations composants vers les outils de simulation système.

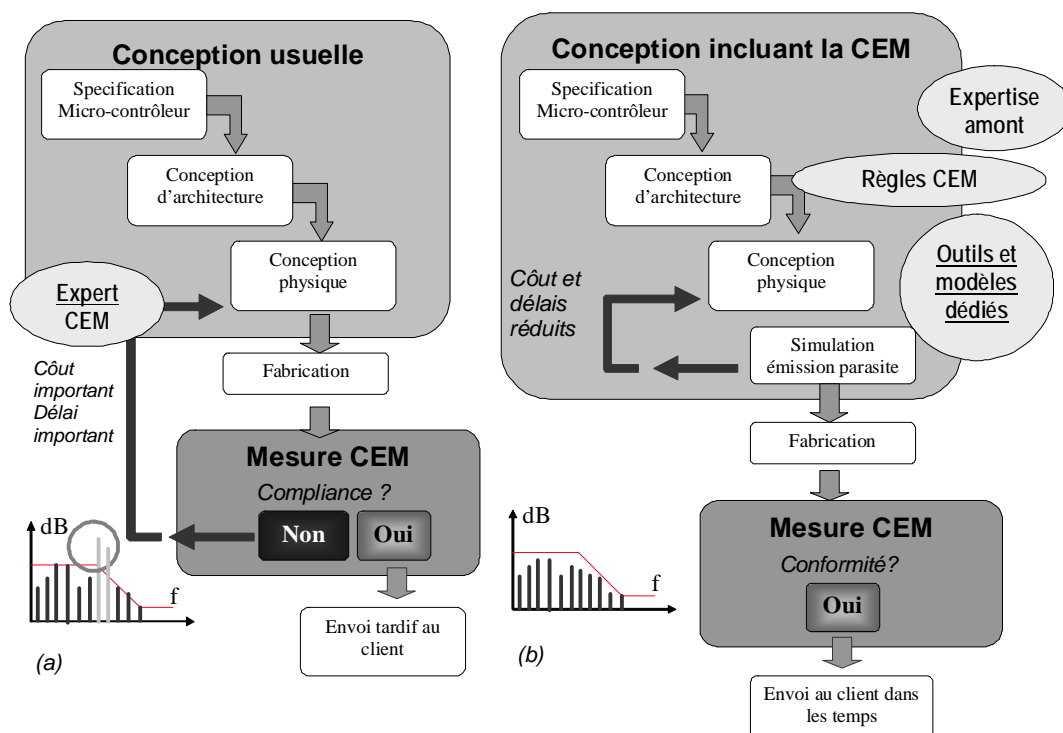


Figure 2 : Les problèmes CEM détectés en mesure (a) induisent d'importants délais et surcoûts, tandis que ceux traités dans les cycles de conception diminuent les risques de non-conformité (b)

A la nature pluridisciplinaire de la CEM composants se rajoute le formidable grand-écart entre la complexité inhérente aux composants (jusqu'à 1 milliard de transistors sur puce, autant de sources de courant, R,L et C, l'équivalent de 10 Km d'interconnexion) et les besoins en simplifications extrêmes des équipementiers (une source de bruit, une impédance). La CEM composants, comme toute démarche de conception, requiert des modèles qui doivent rester simples tout en fournissant des prédictions de niveaux d'émission et immunité précis en un temps de simulation raisonnable.

Le domaine apparaît à beaucoup de personne comme une nébuleuse complexe, d'où émergent quelques gourous intervenant souvent dans des cycles d'urgence critique, avec la crainte d'itérations de design supplémentaires, et par voie de conséquence des délais et surcoûts associés. Une demande s'est donc fait sentir ces dernières années pour une prise en compte rationnelle en amont des contraintes liées à la CEM, avec des outils, des méthodologies, des guides et des formations associées (Fig. 2).

L'enseignement spécifique de la CEM composants a démarré sous forme de séminaires spécialisés dans les entreprises, puis de cours intégrés dans le cadre de formations initiales, en général au niveau BAC+5. Les outils spécifiquement adaptés à une pédagogie efficace n'existaient pas jusqu'à une période récente, même si de nombreux logiciels de référence en conception électronique et radiofréquence ont pu servir de support à l'illustration des concepts vus en cours : SPICE pour l'intégrité de signal et les bruits de commutation, HFSS pour la résolution 3D des effets de rayonnement électromagnétique et de couplage, ou encore MATLAB pour les transformations temps/fréquence, conversions d'échelles et d'unités, etc..

III. IC-EMC

Le besoin de développement d'un logiciel dédié au domaine de la CEM composants est né d'une demande récurrent de plateforme non confidentielle de prédiction des performances en émission et susceptibilité des circuits intégrés, utilisant des ressources minimales banalisées (ordinateur standard, simulateur SPICE), reposant et étayant les normes récentes du domaine, autant en méthodes de mesures [3,4], approches de modélisation [11] et que les standards de descriptions de données composants [10].

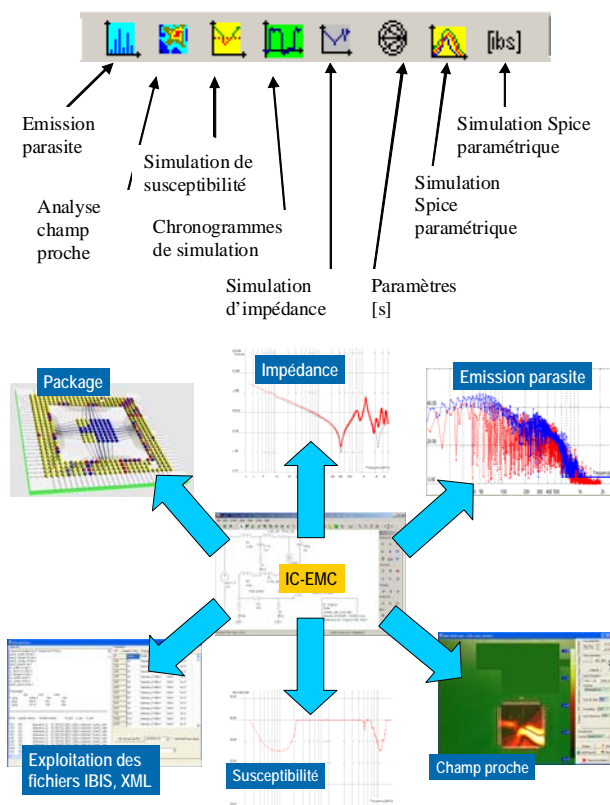


Figure 3 : Outils principaux de IC-EMC

L'idée d'IC-EMC était aussi de démontrer par des itérations courtes de conception/simulation l'efficacité des principales règles de conception CEM telles que le découplage, le filtrage, la réduction des boucles de courant, le blindage, la réduction des pics de consommation, etc.. Le logiciel devait simplifier les étapes de pré et post-processing afin d'aller à l'essentiel : comparaison de spectres d'émission, comparaison de niveaux d'immunité, comparaisons mesures/simulations de provenances hétérogènes.

Le logiciel IC-EMC [12] repose sur un outil de schéma électrique conventionnel et d'une interface avec le simulateur WinSpice [13], dérivé du simulateur Spice version 3f5 de l'université de Berkeley. Les principaux outils disponibles dans le logiciel sont : le traitement des fichiers de simulation analogique en vue d'une représentation dB μ V/fréquence, la caractérisation d'impédance dans le domaine fréquentiel, la simulation de l'immunité par le calcul des puissances incidentes, transmises, réfléchies, et le rayonnement champ proche à l'aide d'un solveur associé (Figure 3). Une documentation importante avec plusieurs cas d'études complets (modèles et mesures) accompagne chaque outil.

IV. Démarche pédagogique

Nous avons mise en place une formation spécifique CEM Composants sous forme d'un séminaire sur un ou deux jours. Le contenu, en ligne sur [14], est le suivant : concepts de base, méthodes de mesure, modèles CEM composants, règles de conception, challenges futurs. La formule sur 2 jours comprend une partie pratique l'après-midi à l'aide de l'outil IC-EMC. Le logiciel est aussi utilisé par l'enseignant pour l'illustration des concepts de base abordés dans la partie cours.

Un ensemble d'outils à forte valeur ajoutée pour l'analyse EMC est utilisé au cours de la formation:

- Une fenêtre de conversion linéaire/dB, dans les différentes unités rencontrées en CEM composants : dB μ V, dBm.
- Une fenêtre de calcul des résonnances LC, exploitant les différentes valeurs d'inductances et capacités mises en œuvre dans le schéma électrique.
- Une estimation du champ électrique et magnétique proche du composant, sur la base de la simulation du rayonnement de dipôles élémentaires. Les élèves peuvent illustrer l'annulation des champs, ou encore la réduction des effets de boucle.
- Une bibliothèque de modèles calqués sur les méthodes de mesures standardisées telles que la cellule TEM (Fig. 5), la méthode 1 / 150 Ω , l'immunité de type DPI, l'immunité de type BCI.
- Un outil de modélisation R,L,C package sur la base de la description IBIS et des données géométriques du composant.

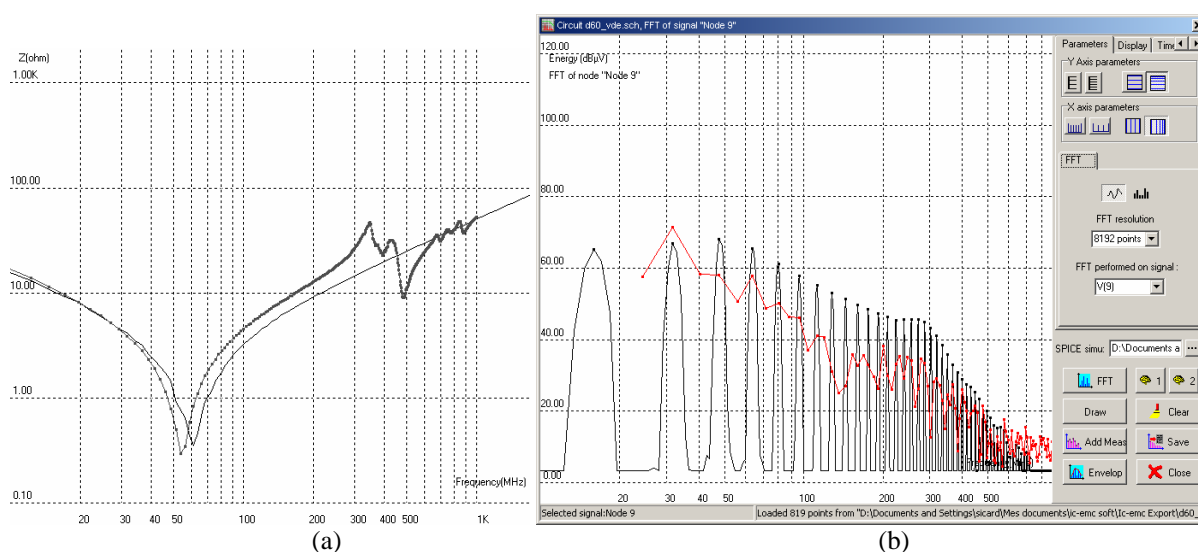


Figure 4 : Exemple de comparaisons mesures/simulation par construction d'un modèle adapté dans IC-EMC : (a) réseau d'impédance interne, (b) émission conduite

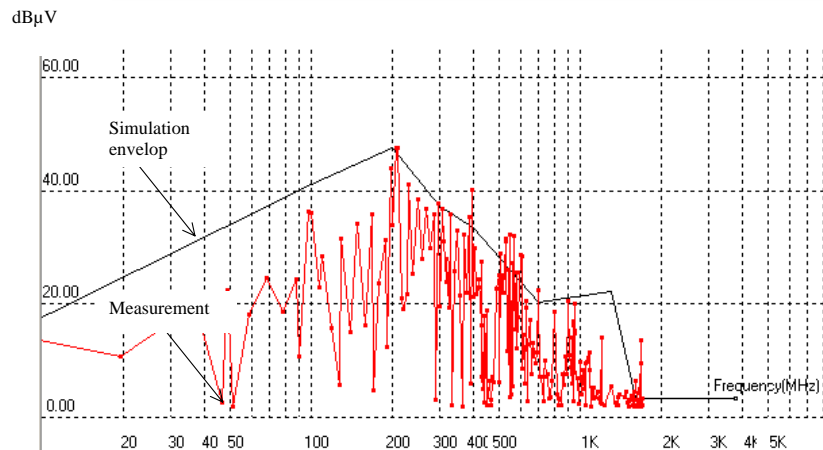
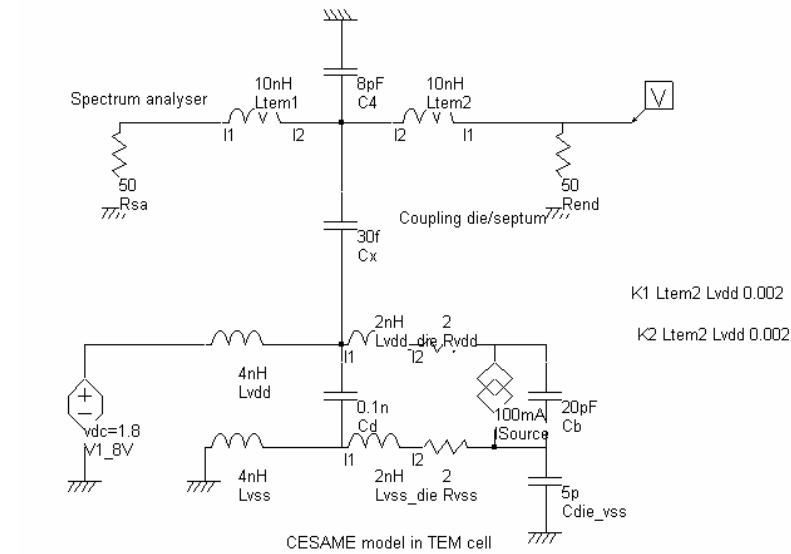


Figure 5 : Modèle de rayonnement en cellule TEM (a) et comparaisons mesures/simulation correspondantes (b)

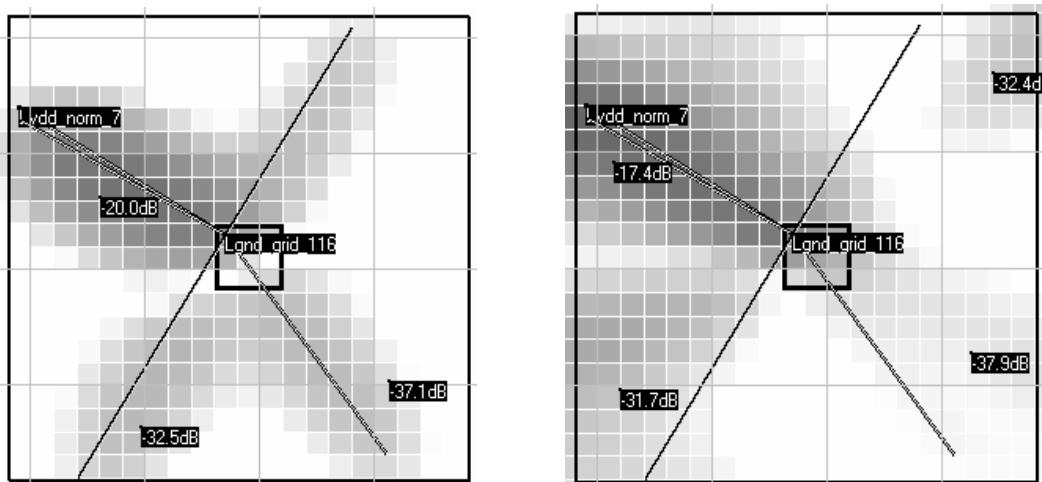


Figure 6 : Simulation (a) et mesure (b) du champ magnétique proche d'un circuit intégré

L'outil a été doté d'une capacité de prédiction du champ magnétique et électrique proche, permettant de reproduire les cartographies de champ mesurées par scanner à l'aide de sondes dédiées (Figure 6). Le même modèle du composant est utilisé pour les prédictions de champ conduit, rayonné en TEM et en scan, ce qui constitue une plus-value considérable. En cours, des cas simples de rayonnement à base de dipôles sont abordés, et des illustrations de cas d'études tels celui de la figure 6 sont aussi proposées.

V. Evaluation

Depuis le démarrage des formations en 2002, plus de 20 sessions auprès de 300 étudiants et ingénieurs ont été organisées, sur une ou deux journées. L'évaluation de l'impact de la formation a été faite sous forme de questions générales, plus de détails étant fournis dans [15]. Les résultats de l'évaluation ont à la fois porté sur la formation initiale dans les départements d'ingénierie (ISEN, ENSME en France) et dans les entreprises (Nokia, On-Semi). A la fin de ce cours, la majorité des étudiants déclarait avoir compris l'origine et les mécanismes principaux d'émission parasite et de susceptibilité. La plupart des auditeurs avait développé une réelle confiance dans leur capacité à manipuler les standards de mesure d'émission et de susceptibilité, et pensait qu'ils pourraient prendre part à une stratégie globale d'amélioration de la CEM, en se déclarant prêts à appliquer les règles de conception proposées. La grande majorité des étudiants évalués a aussi considéré que le sujet avait un lien clair avec leurs cursus, tandis que la grande majorité des ingénieurs formés au sein des entreprises ont trouvé la formation rapidement applicable à leurs projets électroniques. Le logiciel IC-EMC a aussi été utilisé avec succès dans le cadre de tutoriaux de conférences internationales telles que [16].

VI. Conclusion

Cet article a décrit un cours focalisé sur la compatibilité électromagnétique des circuits intégrés, qui a été conduit avec succès dans les écoles d'ingénieurs ainsi que dans l'industrie, pour répondre à la demande de compréhension des problèmes d'interférences au niveau des composants. Le cours tente de donner des moyens pratiques d'amélioration de la conception et de l'utilisation des composants en termes de réduction de bruit et d'augmentation de l'immunité aux interférences. Un outil pédagogique développé en support à cette démarche pédagogique a aussi été présenté, qui a prouvé son utilité en illustration des enseignements et en support aux tutoriaux.

Références

- [1] S. R. Sidore "Automated Digital Computer Program for Determining Responses of Electronic Circuits to Transient Nuclear Radiation (SCEPTRE)", AFWL TR 66-126, Air Force Weapons Laboratory, February 1967.
- [2] IEEE Transaction on EMC – Special Issue EMC of ICs, 1979 available online through IEEE Xplore
- [3] IEC 62132: "Integrated Circuits, Measurement of Electromagnetic Immunity – 150 KHz to 1 GHz", www.iec.ch
- [4] IEC 61967: "Integrated Circuits, Measurement of Electromagnetic Emission – 150 KHz to 1 GHz", www.iec.ch
- [5] www.emccompo.org
- [6] Morris, Melvin M.; , "A New Look at the EMC Problem," Electromagnetic Compatibility, IEEE
- [7] C. R. Paul "Electromagnetics for Engineers", Wiley, NJ, 2004
- [8] A. Charoy, "CEM - Parasites et perturbations des électroniques", Dunod, 4 ouvrages, 2005-2007
- [9] S. Ben Dhia, M. Ramdani, E. Sicard, "EMC of integrated circuits", Springer, 2006, ISBN: 0-387-26600-3
- [10] Informations sur IBIS <http://www.eigroup.org/ibis>
- [11] IEC 62433, "Models of Integrated Circuits for EMI behavioral simulation", www.iec.ch
- [12] E. Sicard, A. Boyer "IC-EMC User's manual version 2.0", INSA editor, July 2009, ISBN 978-2-87649-056-7, www.ic-emc.org.
- [13] Logiciel shareware sur www.winspice.com
- [14] Cours en ligne sur www.ic-emc.org
- [15] E. Sicard, A. Boyer, "An Educationnal Approach EMC of ICs", proceedings of EWME 2010 Darmstadt, May 2010
- [16] A. Boyer, S. Ben Dhia, B. Li, M. Deobarro « An Introduction to the modeling and simulation of EMC of ICs », AP-EMC 2010 Beijing, April 12th, 2010
- [17] M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer, S. Ben Dhia, J. J. Whalen, T. Hubing, M. Coenen, O. Wada, "The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits - Past, Present and Future", IEEE Transaction on EMC, Vol. 51, N°1, pp 78-100, February 2009