



**HAL**  
open science

# ROB-CEM I: Un démonstrateur des problématiques de Compatibilité électromagnétiques dans les circuits et architectures électroniques embarquées

Jean-Marc Dienot, Jean-Luc Massol, Jose Gonzalo, Marie-Francoise Pastor

## ► To cite this version:

Jean-Marc Dienot, Jean-Luc Massol, Jose Gonzalo, Marie-Francoise Pastor. ROB-CEM I: Un démonstrateur des problématiques de Compatibilité électromagnétiques dans les circuits et architectures électroniques embarquées. Alexandra Knaebel; Gérald Ferblantier; Olivier Rohr; Pierre Mousseau; Rodolphe Dalle. 50 ans de Recherche et d'Innovation dans les IUT, 3, Edition l'Harmattan, 2018, IUT#Uni(di)vers(c)ité, 978-2-343-12974-7. hal-04289046

**HAL Id: hal-04289046**

**<https://hal.science/hal-04289046v1>**

Submitted on 16 Nov 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.

# ROB-CEM I : UN DEMONSTRATEUR DES PROBLEMATIQUES DE COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE DANS LES CIRCUITS ET ARCHITECTURES ELECTRONIQUES EMBARQUEES

Jean-Marc Dienot, Jean-Luc Massol, José Gonzalo, Marie-Françoise Pastor  
Labceem - IUT de Tarbes

Nous présentons, à travers un démonstrateur de système mobile baptisée Rob-Cem I, les problématiques de Compatibilité Electromagnétique (CEM): couplages, émissions et immunité au niveau des composants et circuits électroniques dédiés à l'embarqué. Ce démonstrateur est issu des développements menés au sein de la Plateforme LABCEEM du Département GEII de l'IUT de Tarbes. Les émissions électromagnétiques en conduit et rayonné sont caractérisées et servent à l'identification des sources de bruit électromagnétique du système. L'immunité aux agressions harmoniques et transitoires sont passées en revue, notamment sur les parties commandes du système, faisant apparaître la notion de risques électromagnétiques quant à l'intégrité des missions des systèmes. Nous présentons des exemples permettant de maîtriser et d'optimiser les performances CEM de ces architectures.

## INTRODUCTION

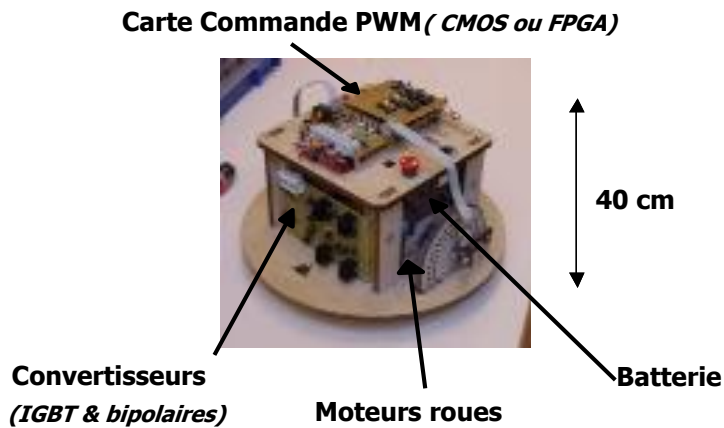
Les problématiques de Compatibilité Electromagnétique (CEM), couplages, interférences, émission et immunité, sont devenus critiques dans les architectures électroniques embarquées [1], induisant de nouveaux environnements électromagnétiques internes et externes de plus en plus sévères. Autour d'un prototype de système mobile, Rob-cem I, regroupant des technologies de circuits de puissance pour la traction et de cir-

uits intégrés numériques pour le contrôle et la transmission des informations, nous parcourons l'ensemble de ces aspects CEM, à la fois théorique et expérimental[2]. L'étude du comportement électromagnétique global du système est d'abord passée en revue. Puis l'analyse des émissions électromagnétiques et de leurs modes de propagation est centrée sur les modules de puissance et de contrôle présents sur le robot. Ensuite, les agressions possibles et les défaillances sont observées sur les parties commande et capteurs, principales victimes. L'ensemble de ces travaux et expérimentations permet de comprendre tout l'enjeu de l'architecture électronique dans des systèmes mobiles autonomes, les couplages internes et externes, l'influence et l'impact des nouvelles technologies électroniques et de leur design sur les systèmes embarqués actuels et futurs [3].

## **PRESENTATION DU DEMONSTRATEUR ROB-CEM I.**

### **Architecture de Rob-cem I.**

Le robot Rob-cem I est un petit système mobile, de taille 50cmx50cmx 40cm, réalisé en 2000 lors de projets d'étudiants IUT (Fig. 1 – ). Nous l'utilisons aujourd'hui pour illustrer et étudier les impacts des perturbations CEM sur un appareil autonome, à la fois d'un point de vue expérimental et de modélisation. Sur une structure principalement en bois intéressante d'un point de vue EM, il combine différentes technologies électroniques de base utilisées pour le transport électrique intelligent : motorisations à courant continu sur chaque roue, carte de puissance à transistors MOS ou IGBT avec leurs drivers (Bipolaires), carte de commandes versatiles, en technologie CMOS, CMS, ou intégrées avec mémoires (FPGA), capteurs de position et vitesses, transmission avec ou sans fil. Il est autonome par la gestion d'une énergie sous forme de batterie intégrée, de tension nominale de 12V.



*Fig. 1 – Vue du démonstrateur - prototype Rob-cem I sur son support d'étude*

### **Bruit électromagnétique global de Rob-cem I.**

La première partie de la démonstration consiste à observer la réalité du bruit électromagnétique de l'ensemble du système, afin d'en tirer quelques conclusions sur leurs causes. Le robot est mis en situation de fonctionnement avec une programmation de mouvement fixé. Cette première évaluation utilise un banc CEM dédié, composé d'un analyseur de spectre 9KHz-1.8GHz, d'une cellule GTEM, DC-18GHz disponible sur la plate-forme Labceem de l'IUT [4]. Un spectre d'émission est obtenu, qui sert de première base d'analyse pertinente (*Fig.1*). Il permet d'identifier les différentes sources de rayonnement et de les lier à l'architecture du robot. L'information principale est que le bruit électromagnétique est dû, de manière non négligeable, aux différentes gammes de commutations et fréquences équivalentes des circuits utilisés : moteurs (Harmonique 10 kHz), MOS (2µs), IGBT (600ns), Bipolaires de puissance (100ns), CMOS/calculateurs (10ns), Emetteurs sans fils (Wifi, Bluetooth, 2,4GHz). Le spectre d'émission rayonnée peut s'étendre jusqu'à 1 à 2 GHz, alors que la fréquence nominale du système ne dépasse pas 10 kHz.

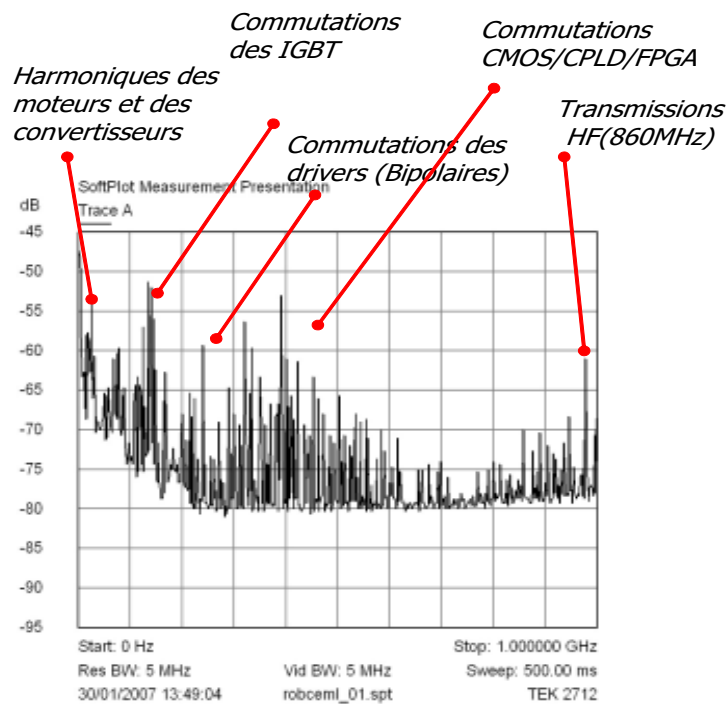


Fig.1 – Spectre de bruit électromagnétique de Rob-cem I et identification fréquentielle des sources

### Evaluation des couplages et risques électromagnétiques sur Rob-cem I.

La deuxième démonstration sur le système consiste à évaluer ses réactions aux agressions électromagnétiques externes et les risques de dysfonctionnement que cela peut entraîner [5]. Pour cela, nous identifions d'abord les parties les plus sensibles du système, qui sont les connections électriquement longues :  $L > \lambda / 10$ , et les fonctions sensibles des circuits intégrés ; RESET, INHIB, CTRL, etc...

Avec le robot en fonctionnement, trois tests de susceptibilité sont proposés (Fig.2) : le couplage en champ électrique : l'expérimentateur approche sa main du fil de commande, à environ 3-4cm dans l'air. Le Reset du circuit s'active, la commande PWM1 devient inopérante : le robot se met alors avancer de

manière erratique. Pour minimiser ce couplage, le fil "sensible" est relié à un point de masse à proximité. L'effet en champ électrique n'est plus possible. Cependant la boucle formée alors devient une antenne sensible au champ magnétique H ; c'est ce que l'on démontre en utilisant, au centre de la boucle, un "allume-gaz" à décharge électrique, qui crée des impulsions de champ magnétique à chaque action. Le système se met à s'emballer de nouveau. La troisième démonstration des effets d'immunité consiste à montrer qu'un couplage en champ lointain est possible avec un émetteur HF couramment utilisé : le téléphone mobile. En activant l'appareil, à environ 4-5cm de la carte commande, on arrive, plus difficilement que les cas précédents, à perturber le circuit de commande et le système. Une explication est alors fournie à propos de cette expérimentation : ce n'est pas la source HF (900MHz, 1,8GHZ ou 2,4GHZ) qui se couple avec le circuit mais l'enveloppe basse fréquence des trames de communications envoyées, qui sont autour de quelques kHz.

Pour la suite des démonstrations, nous passons à l'analyse plus fine des différents acteurs de ces phénomènes électromagnétiques : les cartes et composants de puissance comme sources majeures, les cartes et circuits de commande comme victimes majeures.

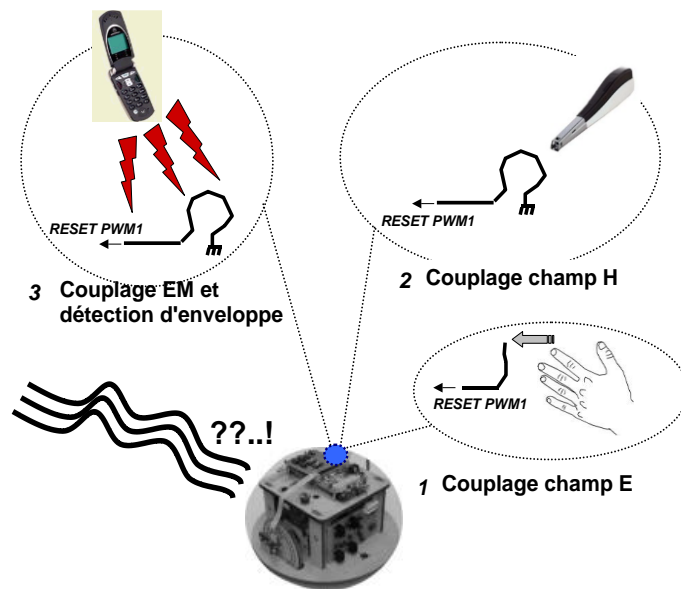


Fig.2 – Les 3 types d'agression et de couplage sur le système mobile Rob-cem I

### EMISSIONS ELECTROMAGNETIQUES DES CARTES DE PUISSANCE DE ROB-CEM I

Les cartes de la famille PTR6 sont des prototypes au format TEM Cell (10x10cm<sup>2</sup>) représentant des modèles réduits d'une commande de puissance réalisé à partir de MOS ou d'IGBT[6]. Leur utilisation est de simuler expérimentalement le comportement électromagnétique en commutation d'une cellule élémentaire avec ses connectiques et sa charge, en vue d'analyses des émissions et du bruit EM. Ces prototypes permettent aussi de relier les comportements CEM à ceux du robot Rob-cem1, comme source de bruit électromagnétique. Le design de ces cartes est spécifique (Fig.3) : le rôle de la semelle d'aluminium, servant à la base de dissipateur de chaleur, présente un autre avantage : elle offre un blindage aux champs électriques extérieurs, ce qui est nécessaire lorsqu'une mesure en cellule TEM est envisagée. Ainsi, le routage a été effectué dans cette optique,

la partie commande en surface, le transistor sur l'autre face. Le routage prend compte la taille des boucles de masse pour des raisons de couplage champ à boucle [6]. Des connecteurs coaxiaux ont été prévus également sur différentes masses, afin d'évaluer les impacts et effets de couplage par impédance commune.

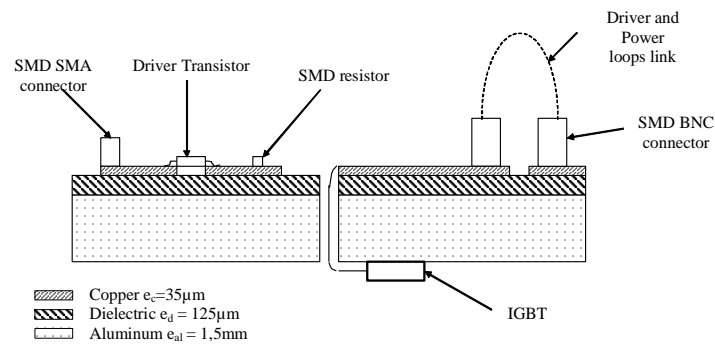


Fig.3 – Vue en coupe de l'implantation des composants sur le PPCB(PowerPCB) Cu-Alu – prototype PTR6

### Analyses en mode conduit –champ proche

Une analyse complète du mode conduit et du champ proche est menée sur cette carte, à l'aide sondes de courant et de tension HF. Après avoir observé des oscillations et surtensions importantes aux fronts de commutation, la mesure champ proche (dipôles électriques, sondes magnétiques H) permet de confirmer la prépondérance du rayonnement EM autour des connexions de masse, ainsi que sur le radiateur. Des études paramétriques permettent d'affiner l'impact des conditions de commutation sur le comportement électromagnétique de la carte : la fréquence de commutation du driver, la tension d'alimentation  $V_{power}$ , le rapport cyclique. La Fig.4 montre notamment la différence de formes d'ondes lors de raccordement de masse driver/puissance/commande, ce qui illustre l'impact de l'impédance commune



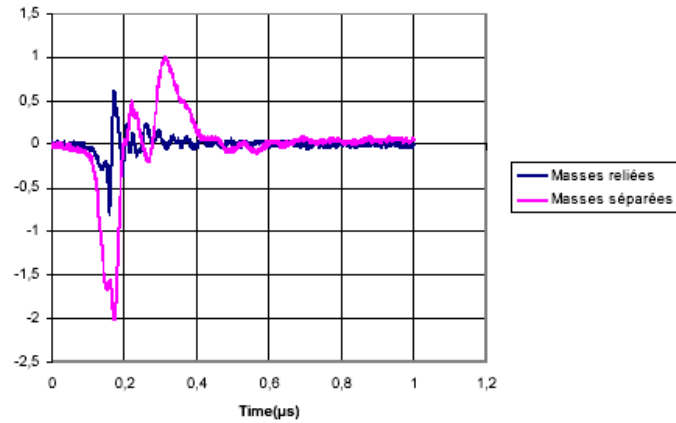


Fig.4 – Tension de masse – mode commun à la commutation sur la partie driver lors de raccordement avec la partie puissance

### Analyses en mode rayonné en cellule TEM.

Le design spécifique de la carte de puissance permet de l'insérer dans une cellule TEM (cellule de Crawford [7]), utilisée pour les investigations CEM et la normalisation au niveau circuit(Fig.5).

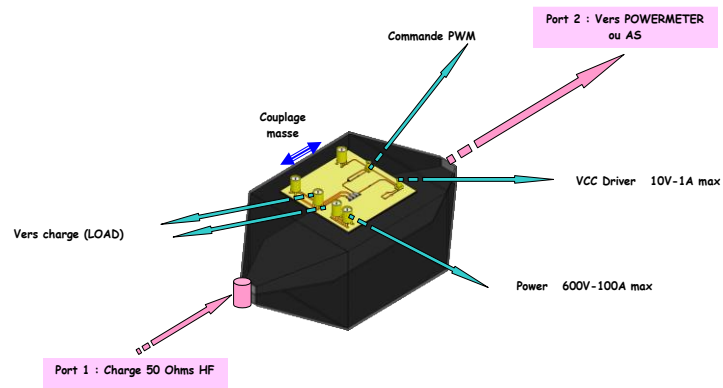


Fig.5 – mise en œuvre de PTR6 sur le banc TEM\_CELL

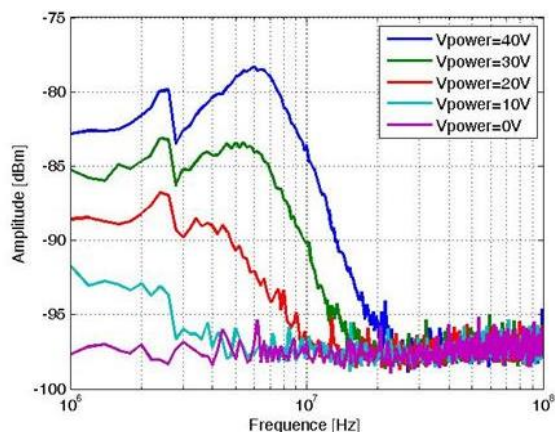
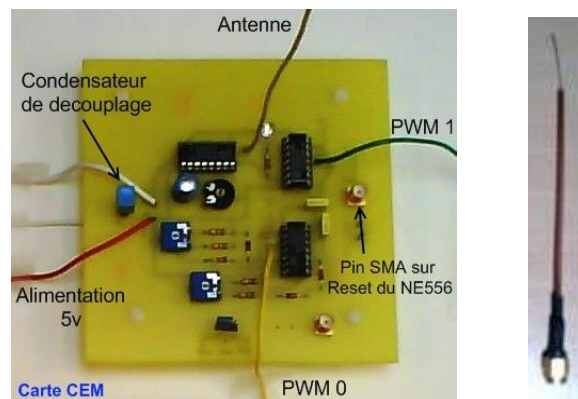


Fig.6 – Variation spectrale du rayonnement de l'IGBT en cellule TEM- différentes tensions de commutation

Les mesures sont réalisées à l'analyseur de spectre (Fig.6). L'analyse des courbes obtenues permet de vérifier l'impact des conditions de commutation et de relier la fréquence de résonance principale (7 à 8 MHz), au design du PCB, de la technologie du composant, mais aussi au spectre observé sur le système complet Rob-cem1 (cf. 2.2)

#### **IMMUNITE ET RISQUES DE DEFAILLANCE DES CARTES DE COMMANDE DE ROB-CEM I.**

Cette partie concerne les agressions EM des architectures de commande du Robot. Différentes formes d'ondes d'agression sont proposées pour le test, utilisant un générateur harmonique HF et un générateur de transitoires et de décharges ESD (Electro Static Discharges)[4]. Ces tests sont effectués sur des prototypes de cartes de commande du système Rob-cem1, avec des ajustements permettant l'observation des dysfonctionnements : connecteur SMA sur la PIN RESET, Pin de sélection VDD/RST/GND sur le NE556, condensateur de découplage entre VDD et GND, et réalisation d'une antenne parasite en technologie coaxiale micro-ondes (cuivre rigide) permettant d'allonger les zones sensibles de couplage (Fig.7).



*Fig.7 – Vues la carte test ROBCOM-A et de l'adaptateur - antenne réalisés pour les expérimentations d'Immunité CEM sur la commande de Robcem I*

### **Agressions en mode CW harmonique**

Ce test consiste à envoyer une onde sinusoïdale de fréquence variable (6 GHz) et d'amplitude variable (-80dBm, +50dBm), afin d'observer les différents effets sur l'intégrité des signaux de commande. On contrôle les critères d'immunité, qui concernent les paramètres des signaux PWM : fréquence, alimentations VDD-GND, rapport cyclique, valeur moyenne.

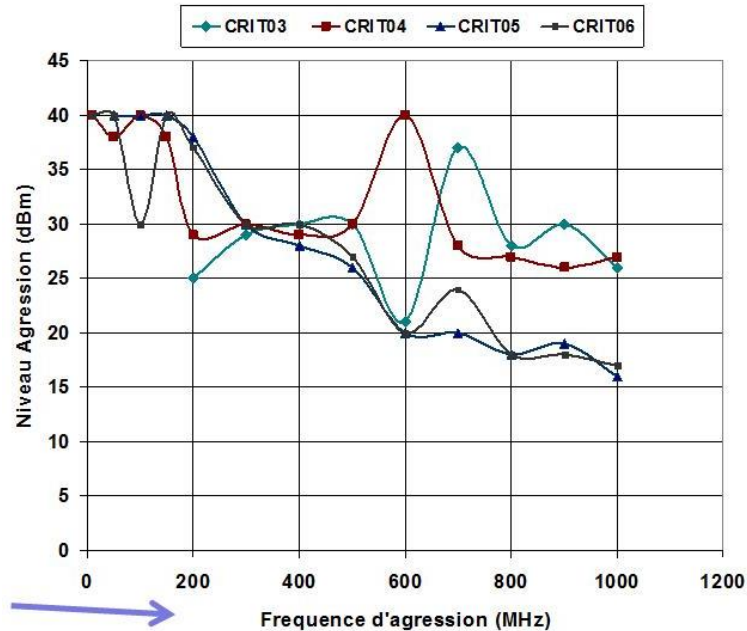


Fig.8 – Résultats de l'immunité de la carte commande en agression harmonique. Crit03 : Rapport cyclique – Crit04: Fréquence – Crit05: Alimentation – Crit06: Valeur moyenne

A l'issue de cette expérience (Fig.8), nous montrons la réalité du couplage des circuits de commande du robot avec des niveaux et gammes de fréquences similaires aux équipements RF-HF environnants.

### Agressions en transitoires

Les agressions en mode "Surge" consistent en l'envoi d'une onde impulsionnelle d'amplitude réglable, répétée plusieurs fois. Le signal est injecté avec une antenne à différentes distances et orientations dans l'espace vis à vis de la carte "victime"(Fig.9). En faisant varier le niveau du générateur pour différentes distances, on relève la défaillance éventuelle (ON:OFF) sur le signal de commande.

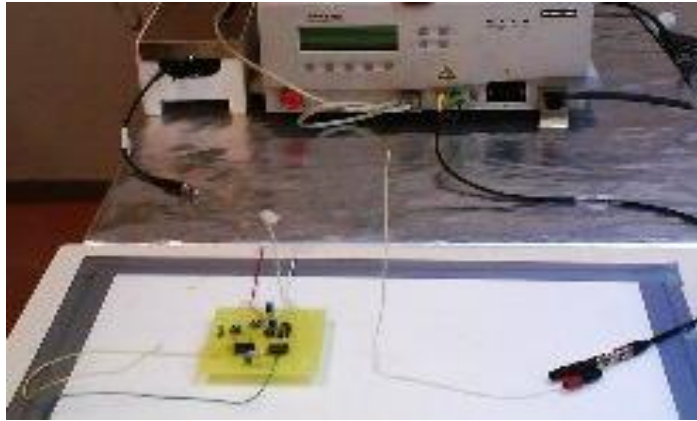


Fig.9 – Vue du banc d'agression sur les prototypes de cartes de commande avec le générateur de transitoire/Surge

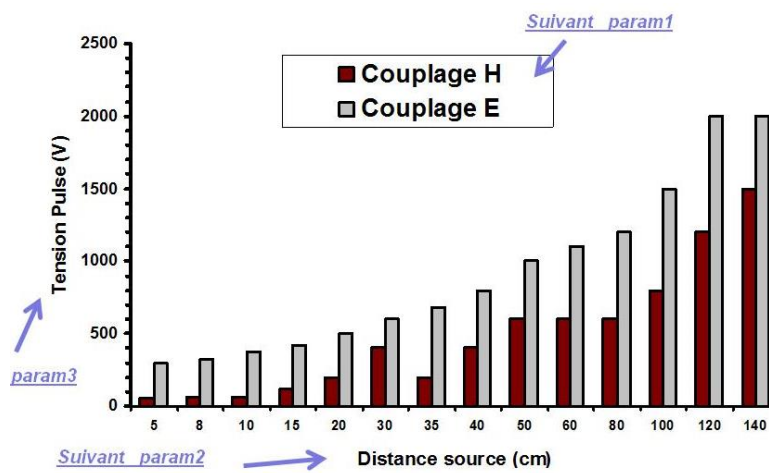


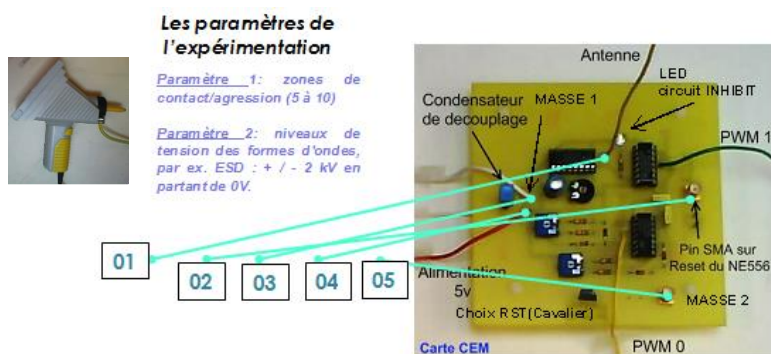
Fig.10 – Résultats des couplages et défauts en agression champ Pulsé

Les résultats (Fig.10) pointent la problématique du couplage différencié E/ H avec la distance d'agression.

### Agression en mode ESD- mode conduit.

Un pistolet ESD est utilisé, connecté au générateur Haute Tension, afin d'effectuer une étude locale des points sensibles de la carte (Mode Conduit). Les supports de circuits permettent l'extraction et le remplacement des composants, car cette manipulation peut se révéler destructive pour les C.I.

A l'issue de cette expérience (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), la confirmation est faite que la PIN d'alimentation (VDD) et la PIN de Reset inutilisée sont les deux points extrêmement sensibles à une agression électromagnétique, entraînant la défaillance du signal de commande PWM1, temporairement ou définitivement, et par conséquent agissant sur la trajectoire du système mobile qui utilise cette fonction [9].



### Résultats (sur CRIT01)

Paramètre 1	zone agression	Pin INHIB	Pin RESET	Pin MASSE1	PIN ALIM1	Pin MASSE2
Paramètre 2	Déclenc. inf. à	-200 V	-1 kV	-600 V	-600 V	-1 kV
niveau agression	Déclenc. sup. à	200 V	300 V	800 V	400 V	300 V

Fig.11 – Procédures de test et résultats – agressions ESD

## CONCLUSIONS

Pour illustrer et présenter les problématiques d'études et de recherche en Compatibilité Electromagnétique, menés au laboratoire Labceem de l'IUT de Tarbes depuis 1997, un robot roulant, baptisé Rob-cem I, sert de démonstrateur. Il permet d'identifier et de comprendre l'ensemble des cas d'interférences et de risques électromagnétiques issus des architectures modernes utilisées dans les systèmes embarqués, mobiles et autonomes. Après une étude globale sur ce système, des tests et focus particuliers sur des cartes de puissance et de commande utilisées sur ce robot sont analysées, tant du point de vue émissions électromagnétiques que du point de vue immunité et susceptibilité. Cette présentation [9] avec ce démonstrateur et l'ensemble des études qui l'accompagnent ont un double rôle :

- identifier et comprendre, les verrous et problématiques d'interactions électromagnétiques dans les systèmes électroniques embarqués et mobiles, avec une vision particulière de la physique et de la conception des architectures électroniques modernes.

- mener et développer des recherches visant à maîtriser et transférer dans les applications industrielles les nouvelles pratiques et approches de la CEM et des normes, liées à l'émergence de nouvelles technologies et matériaux de l'électronique embarquée.

## REFERENCES

- [1] S. Weber, S. Guttowski, E. Hoene, W. John and H. Reichl, "*EMI Couplings from Automotive Traction Systems*", In Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 1, pp. 591-594, Istanbul(TUR), May 11-16, 2003.
- [2] J.M. Dienot, "*Investigations on electromagnetic noises and interactions in electronic architectures: a tutorial case on a mobile system*", in Mediterranean Telecommunication Journal, U.R.S.I. Ed., Volume 2, N°2, pp 58 – 73, October 2012.
- [3] J.M. Dienot, "*Investigations of electromagnetic behavior and interaction of motion control electronics devices.*", in Ultra-Wide-band Short Pulse Electromagnetic Book, n°9, pp. 361-367, Springer Science, ISBN 978-0-387-77844-0, April 2010.
- [4] "Plate-forme Labceem – Contraintes Electromagnétiques & Electronique Mobile", <http://labceem.iut-tarbes.fr/>

- [5] X. K. Gao, E. K. Chua, and E. P. Li, "Integrated EM immunity design and diagnosis system for electronic devices", in Proc. of 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 329-332, Kyoto, Japan, July 20-24, 2009.
- [6] E. Batista, J.M. Dienot, "EMC characterizations for Switching Noise Investigation on Power Transistors", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Detroit, USA, August 18-23, 2008.
- [7] J.P. Muccioli, T.M. North and K.P. Slattery, "Investigations of the theoretical basis for using a 1 GHz TEM cell to evaluate the radiated emissions from integrated circuits", In Proc. IEEE EMC-S, Santa-Clara, pp. 63-67, August 1996.
- [8] J.M. Dienot, E. Batista, J.L. Massol and P. Chalimbaud, "Study of a Near-Field Antenna Module for Real Electromagnetic Noise and Reliability Evaluations", in Proceedings of 5th International Conference on electromagnetic Near-field Characterization and Imaging (ICONIC), Rouen, France, Nov. 30-Dec. 2, 2011.
- [9] J. Masson, "Emission et immunité d'une architecture de commande pour Système Mobile Autonome(SMA)", Rapport de stage, réalisé au laboratoire Labceem, Juin 2008.
- [10] J.M. Dienot, "Cemland, Tarbes (A64, sortie ouest)", Revue des Départements de Génie Electrique et Informatique Industrielle, GESI n°69, pp 34-36, Juin 2007.