

MODELE COMPORTEMENTAL DES PERTURBATIONS EMISES EN MODE CONDUIT PAR LES SYSTEMES EMBARQUES

V. Broun, Ph. Camus, P. Vignisse, V. Beauvois*

Haute Ecole de la Province de Liège Rennequin Sualem – Département Ingénieurs Industriels
Quai Gloesener 6 – B-4020 Liège Belgique

E-mail: valery.broun@prov-liege.be

*Université de Liège – ACE (Applied & Computational Electromagnetics)
Institut Montefiore B28 – B-4000 Liège Belgique

Résumé. Des mesures en émission conduite effectuées sur des systèmes embarqués montrent une influence directe des instructions exécutées par le processeur sur la répartition fréquentielle et l'amplitude des perturbations générées. De plus la majorité des composants d'un système embarqué possèdent une signature spectrale représentative.

Un modèle simple, basé sur la consommation en courant d'étages CMOS, a été développé. Il permet de mettre en évidence la corrélation qui existe entre les perturbations générées par un microcontrôleur et le logiciel en cours d'exécution. D'autre part, des mesures effectuées sur différentes cartes électroniques ont permis d'isoler les signatures spectrales de divers composants. Il est ainsi possible de prévoir le spectre émis par d'autres cartes comportant les mêmes composants.

Introduction

Les systèmes embarqués sont équipés de microcontrôleurs qui sont une des sources principales des perturbations électromagnétiques. La conception de systèmes minimisant ces perturbations est une des préoccupations majeures des développeurs. Ceux-ci ne peuvent généralement avoir recours à des vérifications qu'a posteriori via des mesures coûteuses dans des laboratoires spécialisés. Le développement d'outils permettant de prévoir, dès les premières étapes de la conception, la nature et l'importance des perturbations que va générer un système, est donc extrêmement utile. C'est l'objet de ces recherches, plus particulièrement dans le domaine des perturbations émises en mode conduit, liées à l'exécution de logiciels sur des microcontrôleurs ainsi qu'aux différents composants présents sur le système.

Modélisation d'un processeur

Un processeur peut être modélisé par le biais des signaux présents sur ses bus d'échange de données : bus de données, d'adressage et de contrôle. Ces signaux dépendent des instructions exécutées et peuvent être modélisés simplement en se basant sur les caractéristiques du processeur choisi : codification du langage machine, configurations des bus et

diagrammes temporels. La procédure à suivre pour calculer le courant consommé est la suivante : (1) extraire la suite d'instructions à partir du programme source, (2) transformer cette suite d'instructions en signaux sur les différentes lignes des bus en additionnant à tout instant t , où se produit une transition, les consommations en courant provenant de chacune d'entre elles et (3) calculer le spectre fréquentiel du courant.

Un cas concret

Afin de prouver l'influence directe que les signaux électriques ont sur le spectre émis en mode conduit, les hypothèses formulées précédemment ont été testées sur un cas concret. Les mesures et simulations ont été réalisées à partir d'une carte électronique basée sur un microcontrôleur 80C32 de chez Intel. Ce processeur n'utilise aucun dispositif de pré-chargement des instructions.

La carte électronique représenté à la figure 1 comporte, outre son alimentation et son quartz, une EPROM où le code sera stocké afin d'être lu, interprété puis exécuté par le microcontrôleur ainsi que des bascules permettant de mémoriser l'adresse basse du bus, celui-ci étant multiplexé.

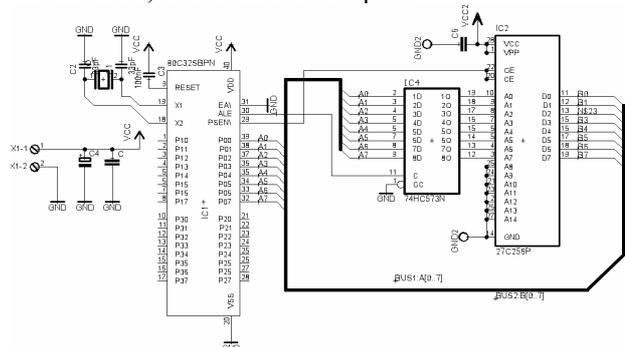


Figure 1 : Schéma de la carte électronique

L'instruction NOP (0x00) a été placée à chaque adresse de l'EPROM. Seul le bus d'adresses sera incrémenté de 0x00 à 0xFF toutes les 12 périodes d'horloge. Comme le bus d'adresses est multiplexé avec le bus de données les signaux sont un peu plus complexes, ils sont représentés à la figure 2.

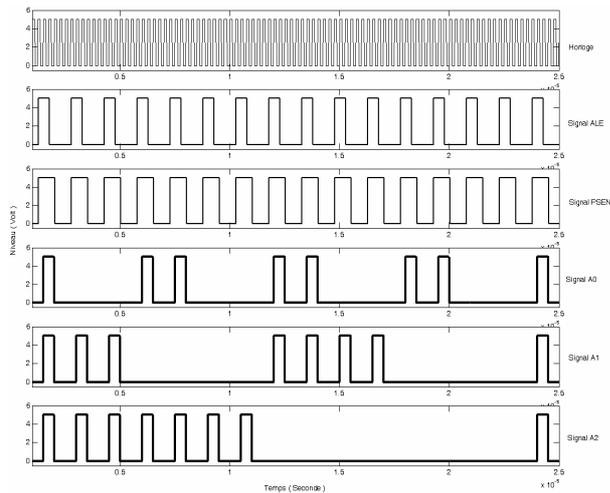


Figure 2 : 6 signaux présents sur la carte de test

En résumé, les signaux électriques sont les suivants : le signal d'horloge, le signal ALE, le signal PSEN, le bus d'adresses et de données en sortie du microcontrôleur ainsi que celui en sortie de l'EPROM. Les contributions de tous ces éléments sont additionnées (figure 3) et chaque transition verticale est remplacée comme expliqué précédemment.

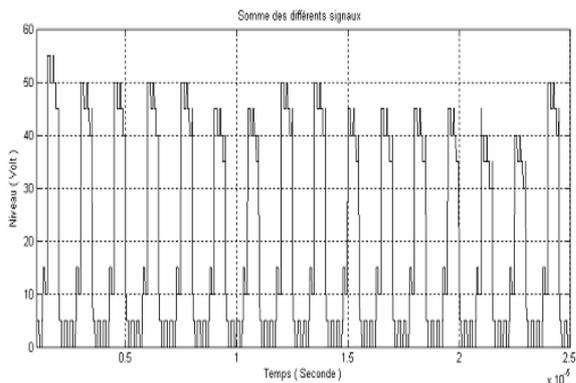


Figure 3 : Somme des signaux présents sur les bus

Ce courant de commutation (figure 4) représente l'évolution temporelle du courant consommé par l'alimentation (en régime dynamique). Ce courant est à l'image de celui qui est mesuré lors des essais en émission conduite suivant la norme CISPR 22. Son spectre peut être dès lors calculé et comparé à la mesure réelle.

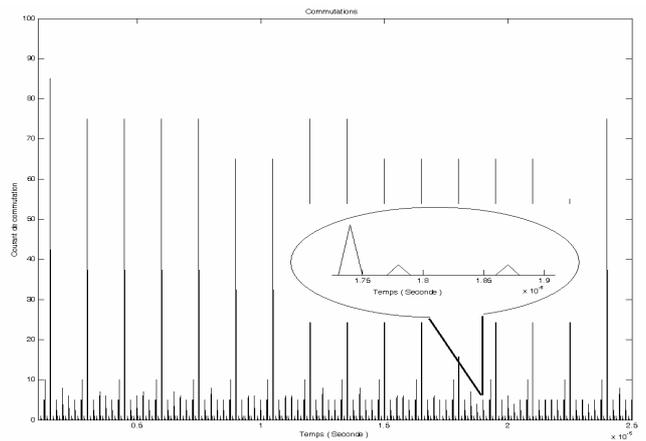


Figure 4 : Courant de commutation

Spectre mesuré et calculé

Le spectre du signal de commutation est généré grâce au logiciel Matlab. Une durée d'une milliseconde et un pas de temps de 10 nanosecondes ont été choisis. Les 100.000 échantillons permettent de calculer la transformée de Fourier jusqu'à 50 MHz, ce qui est largement au-delà des 30 MHz correspondant à la fréquence maximale en émission conduite.

Les figures 5 et 6 montrent un exemple de comparaison entre spectre mesuré et spectre calculé dans le cas d'un microcontrôleur 80c32 réalisant une suite d'opérations NOP.

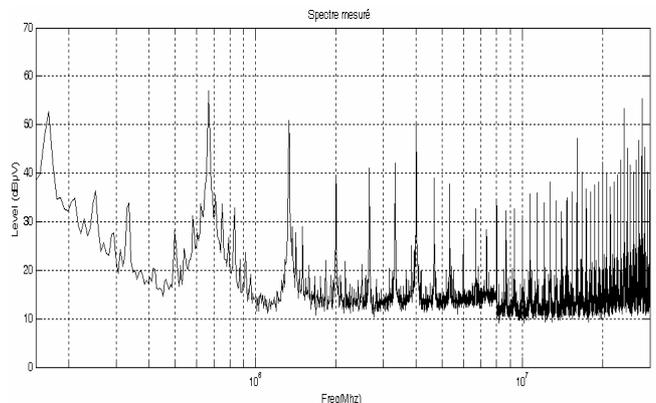


Figure 5 : Spectre mesuré

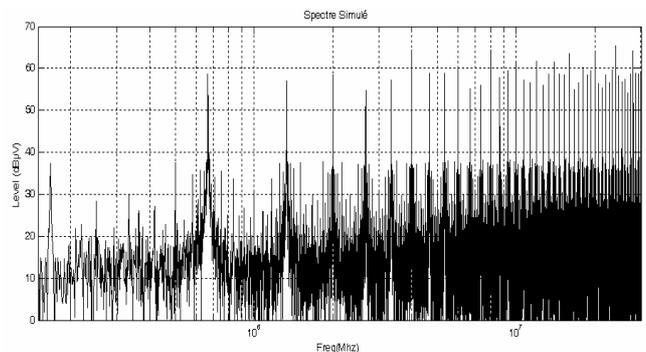


Figure 6 : Spectre calculé (en dBµV ramené sur 50Ω)

On observe sur ces figures que le nombre ainsi que l'emplacement des différentes raies sont identiques. Les différences d'amplitude proviennent des limitations et des simplifications intrinsèques du modèle qui ne tient pas compte du tracé du circuit imprimé et de l'emplacement des composants.

Signature spectrale d'un composant

L'hypothèse de départ choisie a été de considérer que chaque composant d'un système embarqué possède sa propre signature spectrale. Différentes mesures ont été effectuées afin d'isoler la signature d'un convertisseur de niveau pour bus RS-232, le MAX232. La méthode utilisée consiste à mesurer le spectre émis par une carte de test classique en ajoutant ou en retirant le composant. Dans le cas du MAX232, on remarque que la signature spectrale est constituée d'un pic à 250 kHz et de ses harmoniques.

Nous avons également développé un modèle spécifique destiné aux régulateurs de tension linéaires qui permet d'isoler leur signature spectrale et de pouvoir par la suite, selon la puissance consommée, prévoir les niveaux de perturbations émis.

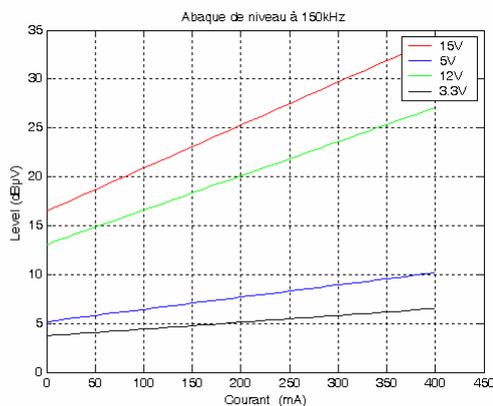


Figure 7 : Abaque de niveau de perturbations à 150 kHz selon le courant consommé, pour 4 types de régulateurs

La figure 8 représente le spectre émis en mode conduit par une carte à microcontrôleur Dallas 80c320 (HSMKISS). Le spectre calculé est représenté à la figure 9 et tient compte de la consommation de la carte au travers de son régulateur de tension ainsi que de l'influence du MAX232. Le modèle reste incomplet vu qu'il ne tient compte que de ses composants mais permet déjà de voir que l'on s'approche du spectre mesuré.

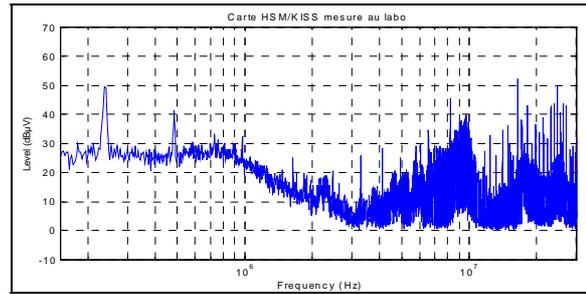


Figure 8 : Spectre mesuré

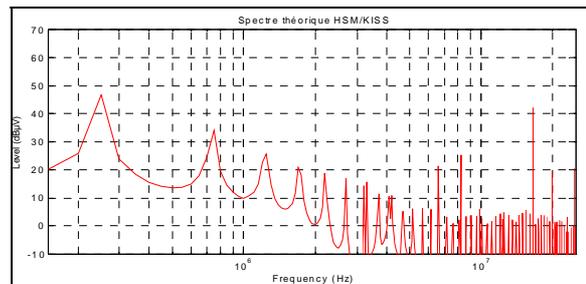


Figure 9 : Spectre calculé

Alimentation à découpage

Le même raisonnement a été appliqué à un convertisseur DC-DC à découpage MSB1205 de la marque Mornsun.



Figure 10 : Système testé

La figure 10 représente le circuit utilisant le convertisseur DC-DC utilisé. La tension Vin est de 12 Volts et la tension Vout fournie vaut 5 Volts. Les deux condensateurs de découplage ont une valeur de 47µF chacun.

Diverses mesures ont été réalisées en faisant varier la valeur de la charge afin de voir l'influence du courant consommé sur le spectre émis en mode conduit.

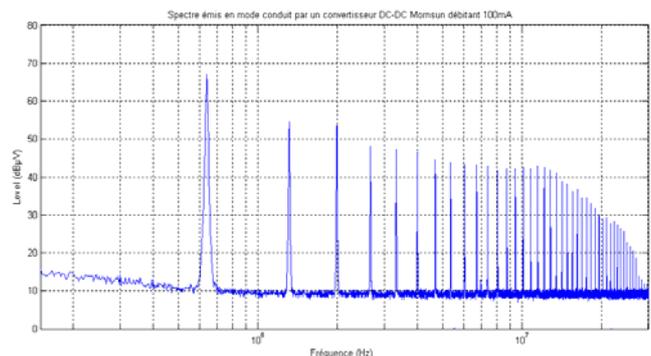


Figure 11 : Spectre émis pour 100mA

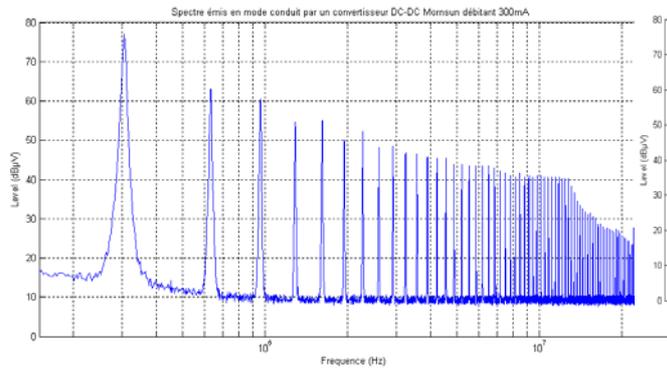


Figure 12 : Spectre émis pour 300mA

On remarque aux figures 11 et 12 l'influence du courant débité par le convertisseur DC-DC sur le spectre émis en mode conduit. Plus le courant débité est important et plus les niveaux émis sont grands et plus la fréquence de découpe est basse, celle-ci variant linéairement avec la valeur du courant.

Afin de modéliser ce composant, nous avons pris pour hypothèse que le courant de commutation du convertisseur DC-DC a une forme triangulaire et plus spécifiquement une onde en dents de scie. Celle-ci a pour spécificité de générer des harmoniques paires et impaires. La figure 13 représente le courant de commutation du convertisseur DC-DC. Ce signal a une fréquence fondamentale de 410 kHz et correspond à une consommation de 200 mA.

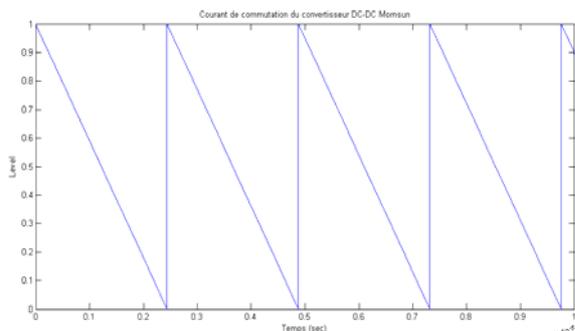


Figure 13 : Courant de commutation émis par le convertisseur DC-DC

Comme dans le cas des signaux présents sur les bus du microcontrôleur étudié précédemment, nous calculons la transformée de Fourier du courant de commutation modélisé comme représenté à la figure 13 afin d'obtenir le spectre émis en mode conduit par le convertisseur. Celui-ci est représenté à la figure 14.

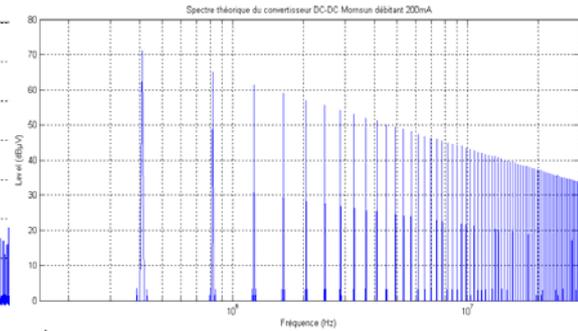


Figure 14 : Spectre théorique

Le spectre émis mesuré en laboratoire est représenté à la figure 15. On peut directement vérifier que le nombre ainsi que l'emplacement des diverses raies spectrales correspond entre mesure et prédiction théorique. Les amplitudes, quant à elles, ne sont pas correctement représentées, vu que, rappelons le, notre modèle ne tient compte que du comportement électrique du système et non des autres éléments filtrants comme les condensateurs de découplage, tracé du circuit imprimé, etc.

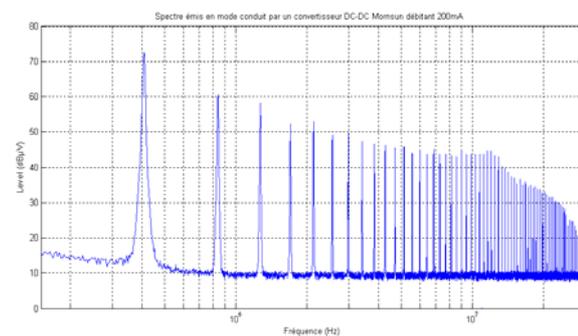


Figure 15 : Spectre émis pour 200mA

A l'avenir...

L'idée de base est donc de pouvoir prévoir le spectre émis en mode conduit par un système embarqué en ne se préoccupant que de son comportement ou de son fonctionnement. Le prochain point à tester sera de réaliser des mesures sur une carte électronique comportant le microcontrôleur Intel 80c32, un MAX232 et alimenté par l'alimentation à découpage Mornsun et de confronter les mesures à la théorie.

Conclusion

La modélisation du processeur fournit des informations qualitatives sur les perturbations émises en mode conduit. Elle indique à quelles fréquences se situent les perturbations et quelles sont leurs importances relatives. Il ne tient pas compte du placement physique des composants sur le circuit imprimé ni des éléments parasites (impédances en série et en parallèle) qui en résultent et qui modifient

l'amplitude des perturbations. Le modèle n'intègre pas non plus, par manque d'informations disponibles, les éléments appartenant à l'architecture interne du processeur. Cependant, les résultats obtenus montrent qu'il est possible de prédire quelles sont les fréquences auxquelles l'amplitude des perturbations est élevée et donc d'améliorer la conception logicielle d'un système embarqué afin qu'il soit conforme aux normes sans avoir recours à des mesures coûteuses en laboratoire.

D'autre part, la signature spectrale de chaque composant d'une carte peut être isolée et réutilisée afin de prévoir le spectre émis par un système embarqué utilisant ces composants.

Références

- [1] *Bogliolo A, Benini L, De Micheli G, Ricco B, " Gate-level current waveform simulation of CMOS integrated circuits". Low power electronics and design, International Symposium on Low Power Electronics, 1996. Monterey, California, USA.*

- [2] *CAMUS Ph., « Etude de la compatibilité électromagnétique d'un système embarqué », travail présenté dans le cadre du D.E.A. en Sciences Appliquée, ULg 2002.*

- [3] *Taylor K.E., "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram", Journal of Geophysical Research, 106, 7183–7190.*

- [4] *Broun V., Camus Ph., Vignisse P., Beauvois V. «Influence du logiciel sur les perturbations émises en mode conduit par les systèmes embarqués » CEM 2006, 4-6 Avril 2006, Saint-Malo, France.*

