

# Analyse des sollicitations sur les condensateurs de filtrage du bus continu d'onduleur pour applications embarquées

T. D. Nguyen<sup>1</sup>, N. Patin<sup>1</sup>, G. Friedrich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique, Centre de Recherche, BP 20529, 60205 Compiègne, France,

Emails: [the-dung.nguyen@utc.fr](mailto:the-dung.nguyen@utc.fr) ; [nicolas.patin@utc.fr](mailto:nicolas.patin@utc.fr) ; [guy.friedrich@utc.fr](mailto:guy.friedrich@utc.fr)

**Résumé :** Cet article traite de la modélisation d'un onduleur placé dans un environnement embarqué (alimentation par batterie) en se focalisant sur la problématique du dimensionnement de la capacité chimique de filtrage de la tension en entrée du convertisseur au regard de la charge utilisée et de la stratégie de modulation utilisée pour la commande de l'onduleur. La stratégie utilisée dans cette étude est une MLI vectorielle classique. Les deux contraintes imposées sur la capacité chimique de filtrage sont pour cela analysées, à savoir l'ondulation de tension tolérée en entrée d'onduleur et le courant efficace circulant dans le (ou les) condensateurs. Sur cette base, l'apport de stratégies de modulation adaptées est discuté. L'approche expérimentale, centrée sur le convertisseur et son alimentation, dans laquelle la machine électrique est remplacée par trois circuits RL série (les bobines à air) facilement caractérisés est également présentée.

**Mots-clés—** Onduleur, Application embarquée, Bus continu, Modélisation, Condensateur chimique, MLI

## 1) INTRODUCTION

La recherche de solutions fiables et compactes pour les équipements électriques dans le domaine automobile est cruciale du fait de leur densité croissante dans un volume très limité. Le dimensionnement des convertisseurs électroniques de puissance, en particulier en ce qui concerne les condensateurs de filtrage placés en entrée d'un onduleur de tension par exemple en fait partie. L'objet de cette étude est d'évaluer, dans un banc d'essai totalement caractérisé et représentatif d'une alimentation de moteur électrique (e.g. alterno-démarrreur) dans une automobile, les sollicitations des condensateurs chimiques et de mettre en évidence le caractère dimensionnant ou non pour le système des ondulations de tension sur le bus continu d'alimentation. En effet, le choix d'une valeur de condensateur peut être conditionné par le courant circulant dans ce dernier (et qui ne doit pas dépasser une valeur maximale donnée par le constructeur) ou par l'ondulation de tension obtenue pour un fonctionnement donné (charge définie avec un facteur de puissance donné). Le lien entre ces deux éléments est bien évidemment l'impédance du condensateur et de son environnement.

L'article débute donc par une présentation du banc d'essai et du modèle retenu pour tous ses constituants. On détaillera particulièrement le modèle des condensateurs chimiques (circuit R-C série) dont les deux paramètres sont liés : une relation analytique a

d'ailleurs été établie sur la base des valeurs trouvées dans les documents techniques d'un fabricant. Pour finir, le système est simulé et testé en situation réelle pour une stratégie de modulation de référence (modulation vectorielle) et les résultats obtenus sont analysés.

## 2) PRESENTATION ET MODELISATION DU BANC

### 1. Présentation globale du système

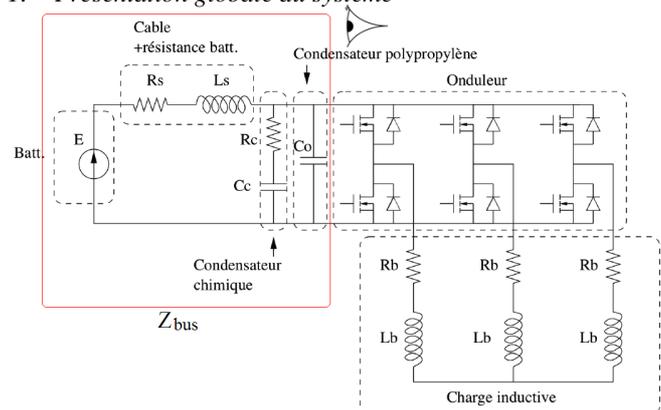


Figure 1 : Modèle de l'onduleur et de son environnement

Le travail présenté dans cet article s'appuie sur un banc d'essai représentatif d'une application embarquée en environnement très basse tension (e.g. automobiles) dont les paramètres ont été identifiés soit expérimentalement [1] (capacité polypropylène, câble, charge) soit modélisés à partir de données

«constructeur» (condensateurs chimique, MOSFET, batterie). La charge utilisée est une charge inductive (bobine à air) représentative d'une machine électrique au démarrage. L'avantage d'une telle charge est qu'elle est facilement identifiable.

- Batterie 12V plomb/acide ayant une résistance interne de 10mΩ.
- Câble d'alimentation de 1.5m ayant une inductance propre de 1.5μH et une résistance 4mΩ. Dans le modèle, cette résistance est couplée avec celle de la batterie pour un total d'environ  $R_s = 14m\Omega$ .
- Condensateur(s) chimiques placés sur le bus continu modélisés par un circuit R-C série équivalent (détaillé dans un paragraphe suivant)
- 6 Condensateurs polypropylènes de 10μF considérés comme idéaux dans la gamme de fréquence d'étude (inférieure à 1MHz).
- Onduleur triphasé constitué de 6 MOSFETs (calibre 100V/500A) ayant une résistance à l'état passant de  $R_{Dson} = 3m\Omega$ . La stratégie de modulation utilisée est une stratégie de modulation vectorielle avec une fréquence de découpage de 20kHz.
- Charge inductive RL triphasé avec inductance cyclique de 408μH et résistance par phase de 52mΩ.

Cet ensemble sera qualifié de modèle 1 dans notre étude. La figure 2 présente l'ensemble onduleur et les condensateurs de découplage.

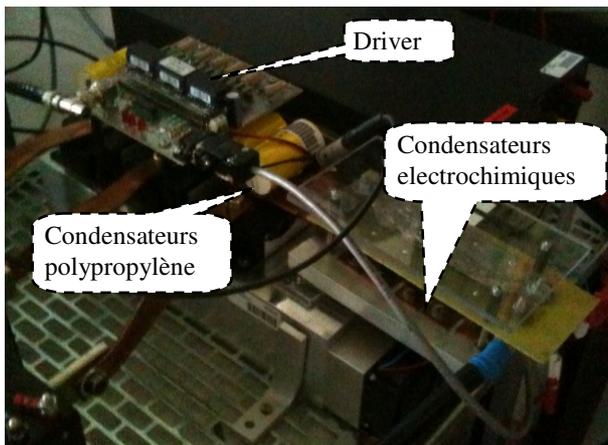


Figure 2 : Photographie du banc d'essai

## 2. Modélisation des condensateurs chimiques

D'après les données fabricants (voir fig. 3), le condensateur chimique est assimilé dans notre étude à un circuit R-C série où la capacité est notée  $C_c$  et la

résistance  $R_c$ . On peut montrer que la relation entre ces deux valeurs a la forme suivante :

$$R_c [m\Omega] = r_0 [m\Omega] + \frac{\tau_0 [ns]}{C_c [\mu F]} \quad (1)$$

On peut également établir une relation entre le courant efficace supporté  $I_{AC}$  par les condensateurs et la capacité  $C_c$  :

$$I_{AC} [A] = I_0 [A] + k \cdot C_c [\mu F] \quad (2)$$

Pour la gamme EVOX RIFA PEG 225 – 25VDC [2], les valeurs de  $r_0$ ,  $\tau_0$ ,  $I_0$ , et  $k$  sont :

$$r_0 = 3.6m\Omega, \tau_0 = 18250ns$$

$$I_0 = 10.56A, k = 2.93 \cdot 10^{-3} A/\mu F$$

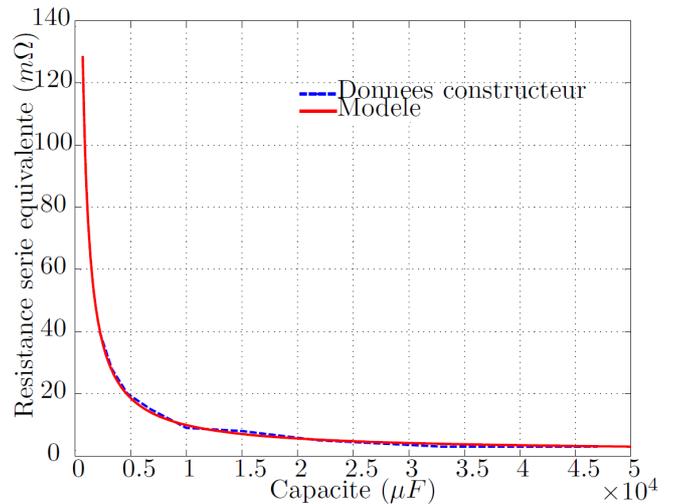


Figure 3 : Relation entre la valeur de résistance série équivalente et la capacité des condensateurs chimiques d'après les données constructeurs

Qualitativement, on peut dire que l'association de condensateurs de faible valeur est intéressante en terme de calibre en courant du fait de l'expression affine (2) de  $I_{AC}$ . En effet, le calibre en courant d'une association de condensateurs de faible valeur est plus élevé que celui d'un seul condensateur de valeur équivalente. De la même façon, on peut se poser la question de la résistance équivalente : l'association en parallèle est en théorie préférable mais le gain est en pratique très modéré du fait de la faible valeur de la résistance asymptotique  $r_0$  introduite dans l'équation (1).

## 3. Outil de simulation

Les simulations présentées dans cet article ont été effectuées à l'aide d'un outil spécifique développé en langage Java permettant de garder une certaine modularité dans l'association d'objets physiques

représentés par des objets informatiques (programmation orientée objets) tout en apportant des performances supérieures à celle de Matlab/Simulink en terme de temps de calcul du fait de la plus grande légèreté du programme. Ce point est particulièrement important pour l'étude paramétrique présentée dans la section suivante qui aurait demandé des ressources et des temps de calculs très importants pour aboutir aux résultats établis pour différentes valeurs de condensateurs électrochimiques.

D'un point de vue mathématique, la simulation repose sur un solveur simple de type « Euler à pas fixe » avec un pas de simulation de  $10^{-8}$ s garantissant la stabilité numérique des simulations et une bonne précision tout en ayant des temps de calculs raisonnables.

### 3) ETUDE PARAMETRIQUE DU SYSTEME

#### 1. Impédance globale du bus continu

L'impédance globale du bus continu (vue de l'onduleur) peut être exprimée par la formule suivante :

$$Z_{bus} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{(R_s + jL_s\omega) \left( \frac{1 + jR_c C_c \omega \frac{1}{jC_0\omega}}{j(C_0 + C_c)\omega - R_c C_c C_0 \omega^2} \right)}{(R_s + jL_s\omega) + \left( \frac{1 + jR_c C_c \omega \frac{1}{jC_0\omega}}{j(C_0 + C_c)\omega - R_c C_c C_0 \omega^2} \right)}$$

où les paramètres  $R_s$ ,  $L_s$  et  $C_0$  sont connus et fixés, les paramètres  $R_c$  et  $C_c$  sont variables et liés entre eux par la relation (2).  $V_{dc}$  et  $I_{dc}$  sont la tension et le courant en entrée de l'onduleur.

L'alimentation à la charge se fait par la commutation des interrupteurs de l'onduleur, or cette commutation provoque des « sauts » de la valeur instantanée du courant  $I_{dc}$ . Si la valeur de  $Z_{bus}$  est grande, la tension  $V_{dc}$  fluctue fortement. Donc, afin de limiter la fluctuation de  $V_{dc}$ , il faut assurer que la valeur de  $Z_{bus}$  soit petite. La tension  $V_{dc}$  peut également fluctuer fortement si une composante harmonique du courant  $I_{dc}$  se trouve dans la zone de résonance de  $Z_{bus}$ .

On constate à la figure 4 qu'une résonance n'est réellement visible sur cette impédance que pour des valeurs de condensateur chimique inférieures à 3mF. Au dessus de cette valeur de capacité, on notera que le module de l'impédance reste relativement constant dans la gamme des basses fréquences avec une augmentation modeste dans la bande de fréquences allant de quelques dizaines à quelques centaines de kilohertz qui constitue la zone où la majorité des composantes du spectre du courant découpé en entrée d'onduleur se trouvent.

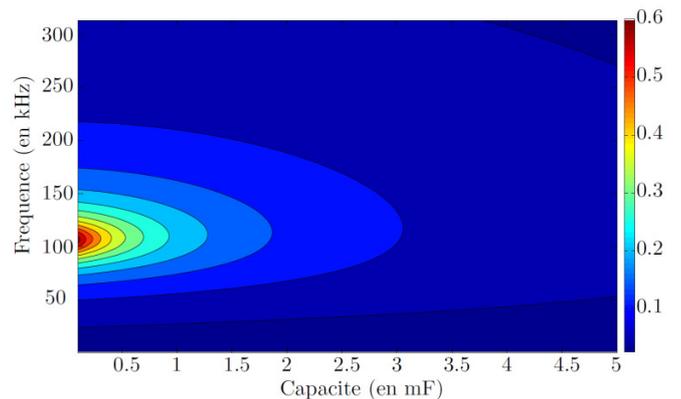


Figure 4 : Cartographie de l'impédance du bus en fonction de la fréquence et de la capacité du condensateur électrochimique (avec la résistance  $R_c$  couplée à cette capacité)

#### 2. Analyse temporelle

Le système est simulé dans le domaine temporel afin d'évaluer l'ondulation de tension en entrée de l'onduleur et le courant efficace circulant dans le(s) condensateur(s) chimique(s).

Ci-dessous sont présentés les synthèses des résultats des simulation en terme de taux d'ondulation de la tension d'entrée de l'onduleur d'une part (fig. 5) et de rapport entre courant efficace observé [3] / courant efficace maximal supporté (fig. 6) par le(s) condensateur(s) utilisé(s) d'autre part en fonction, dans les deux cas, de la fréquence de découpage et de la capacité  $C_c$  mise en place.

Ces résultats permettent alors de définir les points de fonctionnement pour lesquels (avec la stratégie de modulation utilisée) les critères sont satisfaits ou non (voir table 1) : la case notée « 2 » indique un point de fonctionnement pour lequel l'ondulation de tension est trop grande et le courant efficace dans le condensateur trop important. Les cases notées « 1 » correspondent au cas où un seul critère n'est pas satisfait (le courant efficace dans le condensateur dépasse la valeur autorisée). Les cases notées « 0 » correspondent aux points de fonctionnement satisfaisants du point de vue des deux critères.

On constate que seule la première valeur de capacité (2200 $\mu$ F) ne permet pas un fonctionnement correct avec la stratégie de MLI vectorielle classique. Et en particulier, le fonctionnement avec une fréquence de découpage de 2.5kHz (fig. 7) ne permet de satisfaire aucune des deux contraintes (trop d'ondulation et courant efficace trop élevé).

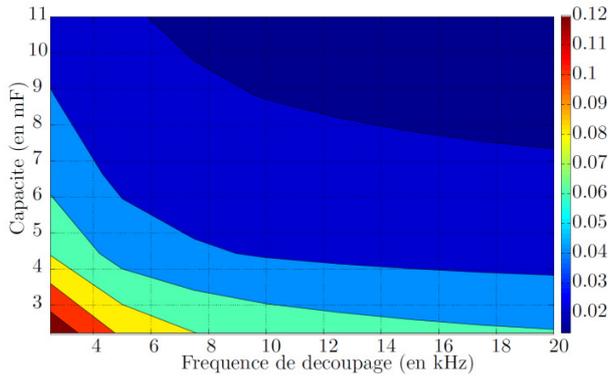


Figure 5 : Cartographie du taux d'ondulation de tension en fonction de la capacité  $C_c$  et de la fréquence de découpage

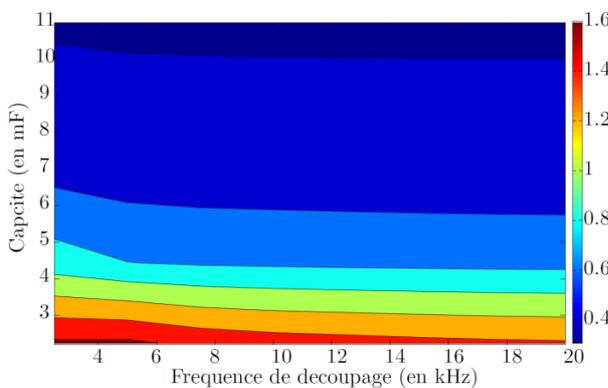


Figure 6 : Cartographie de «courant efficace/ $I_{nominal}$ » en fonction de la capacité  $C_c$  et de la fréquence de découpage

		Fréquence de découpage (en kHz)							
		2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Capacité (en $\mu\text{F}$ )	2200	2	1	1	1	1	1	1	1
	4400	0	0	0	0	0	0	0	0
	6600	0	0	0	0	0	0	0	0
	8800	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 1 : Table des critères non satisfaits pour chaque point de fonctionnement

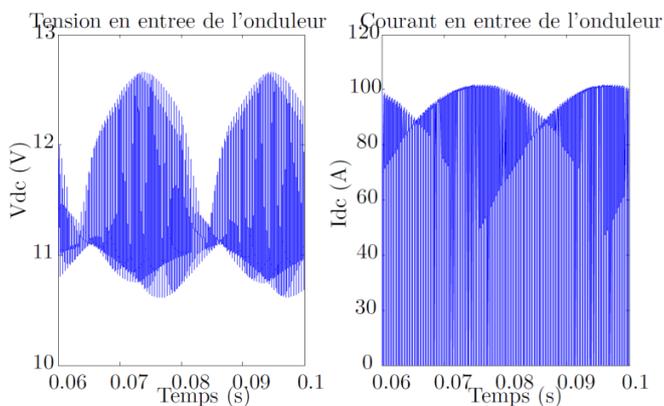


Figure 7 : Formes d'ondes de la tension (gauche) et du courant (droite) en entrée de l'onduleur

A partir de cette constatation, pour les critères choisis, la valeur minimale (donc optimisée selon le critère volume occupé par les condensateurs) du (ou des) condensateur(s) chimique(s) peut être déterminée soit  $4400\mu\text{F}$  à 2,5 kHz de fréquence de découpage.

#### 4) EXPERIMENTATION

##### 1) Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai est constitué des éléments de puissance décrits dans l'introduction comme l'illustre la photographie de la figure 1. Le pilotage de l'onduleur est quant à lui assuré par une carte DSP Texas Instrument TMS320F2812 avec un programme réalisant une modulation vectorielle classique (fréquence de découpage de 4kHz).

##### 2) Surveillance thermique

Les essais étant effectués sous des courants élevés, une surveillance par caméra thermique a permis de vérifier que les condensateurs chimiques, particulièrement sollicités pendant le test, restaient à une température modérée dans la mesure où la dissipation thermique est assurée par un dispositif adapté.

On a pu vérifier sur des essais de plusieurs dizaines de minutes que la température (en régime établi) ne dépassait par  $40-45^\circ\text{C}$  à la surface des condensateurs (cf. Figure 8). Cette surveillance de la température a d'ailleurs permis de mettre en évidence des points chauds au niveau de la connectique du circuit imprimé sur le bus bar fixé à l'onduleur.

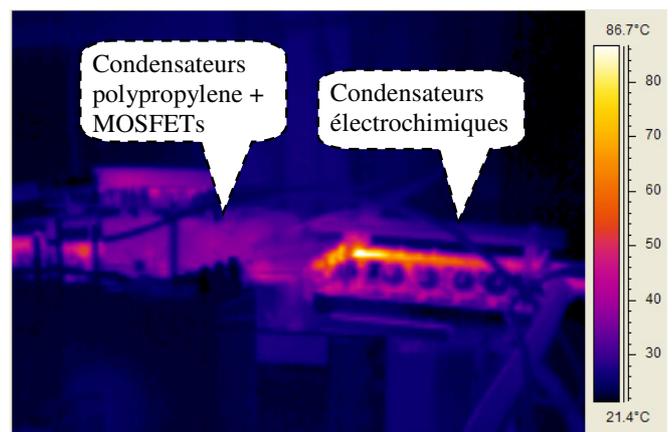


Figure 8 : Condensateurs chimiques montés sur dissipateur thermique

##### 3) Résultats expérimentaux temporels et fréquentiels

Au vu de la température de fonctionnement (estimée à 45°C pour les condensateurs), la résistance série équivalente des condensateurs chimiques est comprise entre 28mΩ (valeur à 100kHz à 25°C – donnée constructeur [2]) et 7.3mΩ (à 100kHz à 125/150°C – également une donnée constructeur). Pour la simulation, nous avons donc considéré une résistance série équivalente *intermédiaire* de 18mΩ par condensateur, soit une résistance série globale de 4.5mΩ pour une capacité de 19.2mF. Toutes choses égales par ailleurs, un essai a été réalisé avec un courant crête de 80A par phase dans la charge.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence des ondulations crête à crête de la tension de bus continu de 2V (soit une ondulation de  $\pm 8.3\%$ ). En simulation, sur la base du modèle présenté en introduction avec la résistance série équivalente globale de 4.5mΩ pour la capacité de 19.2mF, on prévoyait en fait une ondulation nettement plus faible (0.55V crête à crête).

#### 4) Recalage du modèle

L'observation de la température à la caméra thermique nous a permis de mettre en évidence une résistance électrique non négligeable du circuit imprimé servant de support aux condensateurs chimiques. Une mesure de la chute de tension continue entre l'entrée et la sortie de ce circuit imprimé (0.112V sous 20A continu) nous a permis d'évaluer sa résistance équivalente (5.6mΩ). En supposant que cette résistance se scinde en plusieurs résistances égales comme indiqué à la figure 9, on met en évidence cinq résistances de connexion de 1.12mΩ chacune.

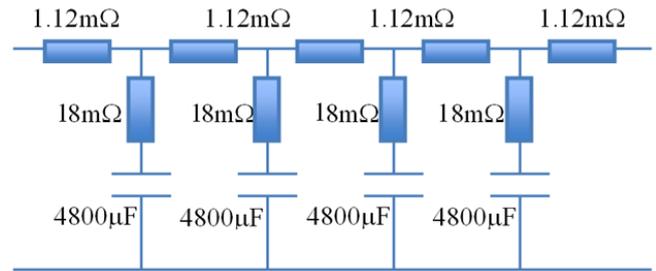


Figure 9 : Modèle du circuit imprimé supportant les condensateurs électrochimiques de filtrage

Des simulations avec ce nouveau circuit équivalent (modèle 2) (présenté à la figure 9) montrent que l'impédance globale du bus continu est fortement modifiée (voir Figure 10) et permettent de rendre compte des ondulations plus fortes de la tension du bus continu (1.1V) comme le montre le spectre présenté à la figure 11. La forme d'onde temporelle de la tension du bus continu est présentée à la figure 12.

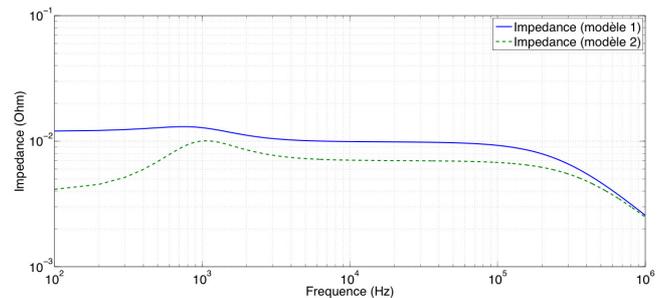


Figure 10 : Impédance globale du bus continu vue par l'onduleur (modèle 1 en bleu et modèle 2 en vert)

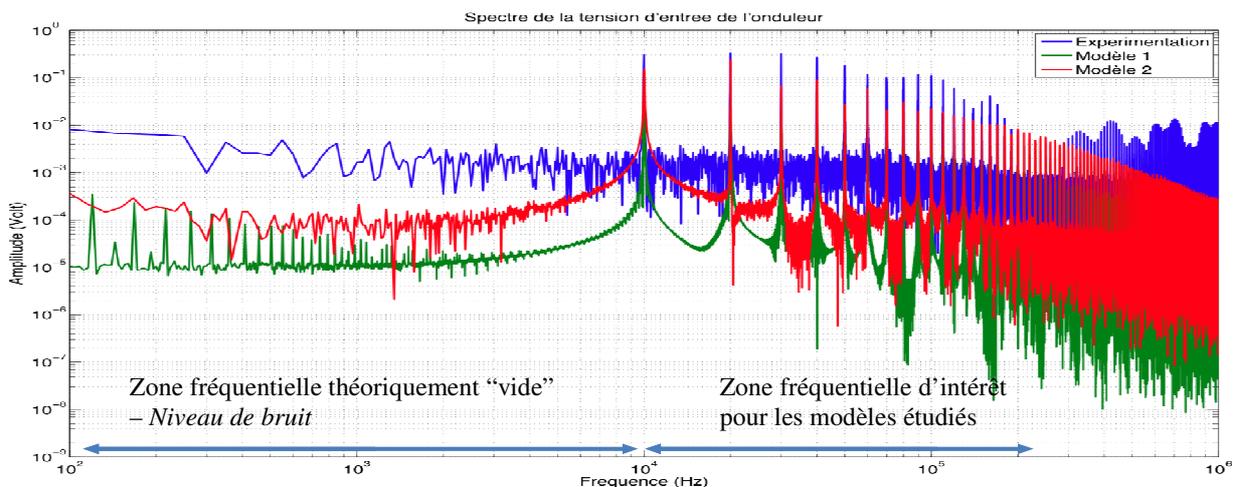


Figure 11 : Analyse spectrale de la tension  $V_{dc}$  (expérimentation en bleu, simulations – modèle 1 – en vert et – modèle 2 – en rouge)

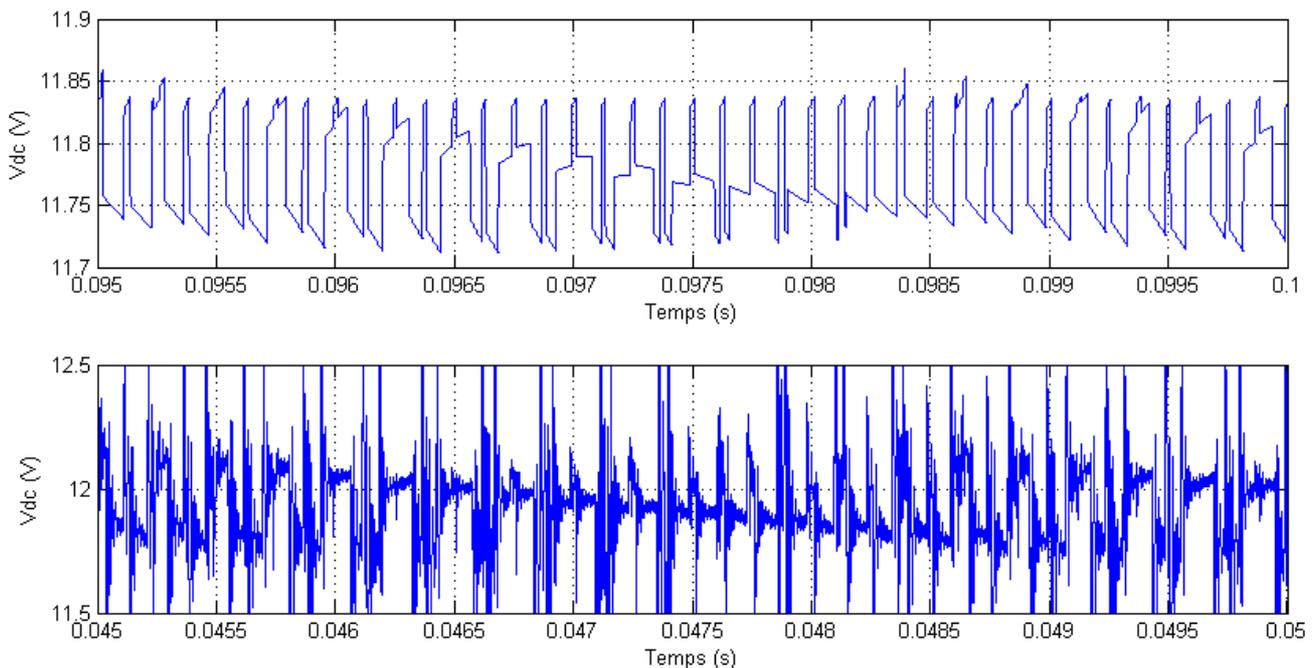


Figure 12 : Formes d'ondes temporelles de  $V_{dc}$  en simulation avec le modèle 2 (courbe du haut) et en expérimentation (courbe en bas)

On notera que dans la gamme 300kHz–1MHz, il y a une différence notable entre le spectre expérimental et le spectre simulé.

La cause de cette différence n'est pas clairement identifiée mais il est toutefois important de noter que dans la gamme de fréquences située entre 10 et 300kHz, il y a une bonne concordance entre les résultats de simulation avec le modèle 2 et les résultats expérimentaux et que les raies présentes dans cette gamme ont une amplitude environ 10 fois plus élevées que celles présentes au delà de 300kHz : par conséquent, le modèle est satisfaisant pour évaluer l'impact de différentes stratégies de modulation sur les perturbations du bus continu.

## V. CONCLUSION

L'article propose une modélisation validée expérimentalement d'une application embarquée orientée vers le dimensionnement « optimisé » des capacités de découplage chimiques. La difficulté d'une telle modélisation pour un onduleur basse tension/forts courants a d'ailleurs été mise en évidence au niveau de la sensibilité du comportement du système vis à vis de la connectique (résistances du circuit imprimé support des condensateurs électrochimiques voire même les résistances de contact des fixations de ce circuit sur le « busbar »). L'analyse temporelle et fréquentielle permet d'évaluer rapidement l'impact de la stratégie de

modulation employée sur la qualité du bus continu et sur le respect des contraintes de stress des condensateurs. Des stratégies adaptées à ces objectifs telles que celles proposées dans [4] et [5] pourront par la suite être évaluées dans ce cadre. Nous savons en effet que la stratégie présentée dans [4] a pour effet direct la réduction de la valeur efficace de la composante variable du courant d'entrée de l'onduleur. Bien que la distribution spectrale de ce courant soit également importante pour évaluer l'ondulation de tension, on sait déjà que les sollicitations des condensateurs chimiques seront réduites et pourront permettre de réduire leur nombre sans risque de dépassement du courant maximal supporté et il est probable, d'après les résultats connus sur cette stratégie que l'ondulation de tension associée soit également atténuée.

## REFERENCES

- [1] The Dung Nguyen, *Modélisation et identification des paramètres du bus continu d'un onduleur triphasé en environnement embarqué*, JCGE'2009, 23 sept. 2009, Compiègne, France.
- [2] PEG 225 Datasheet – Electrolytic capacitors for Automotive Applications, [www.corporate.evoxrifa.com](http://www.corporate.evoxrifa.com).
- [3] F. Renken, "Analytical calculation of the dc-link capacitor current for pulsed three-phase inverters," presented at the EPE Power Electron. Motion Control, Riga, Latvia, Sep. 2004.
- [4] J. Hobraiche, J.-P. Vilain, P. Macret, N. Patin, *A New PWM Strategy to Reduce the Inverter Input Current Ripples*, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 24, No. 1, pp. 172-180, Jan. 2009.
- [5] P. Dahono, Y. Sato, and T. Kataoka, "Analysis and minimization of ripple components of input current and voltage of PWM inverters," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 32, No. 4, pp. 945-950, Jul./Aug. 1996.