

## Impact des émissions EM conduites produites par un hacheur abaisseur

S. Rezini <sup>1\*</sup> et Z. Azzouz <sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie Electrique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Abdelhamid Ibn Badis. Site 1, Route Belahcel 27000, Mostaganem, Algérie

<sup>2</sup> Département d'Automatique, Faculté de Génie Electrique Université des Sciences et de la technologie-Mohamed Boudiaf El Mnaouar, B.P. 1505, Bir El Djir, 31000, Oran, Algérie

(reçu le 10 Septembre 2017 - accepté le 30 Septembre 2017)

**Résumé** - *L'utilisation variée, dans la vie quotidienne, de dispositifs d'électronique de puissance notamment les convertisseurs statiques est devenue de plus en plus courante. Les applications technologiques actuelles de ces derniers requièrent simultanément un niveau de précision et de performance élevé, de sorte qu'ils puissent jouer un rôle très important dans les systèmes de conversion d'énergie. Cependant, en pratique ces convertisseurs posent de nombreux problèmes tels que les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) liés aux perturbations électromagnétiques constituant ainsi une difficulté majeure à surmonter. Aussi, afin d'étudier et de quantifier les phénomènes de génération et de transmission des perturbations conduites, nous nous sommes intéressés dans ce travail à la définition de la signature CEM du spectre fréquentiel des perturbations générées par un hacheur abaisseur. A l'issue de cette étude nous montrons qu'en hautes fréquences le convertisseur étudié constitue une source majeure de perturbation alors qu'en basses fréquences il ne présente aucun danger du point de vue CEM.*

**Abstract** - *The varied use of power electronics devices in daily life has become increasingly important. Current technological applications simultaneously require a high level of precision and performance, so that these devices have a very important role in systems requiring energy conversion. However, these converters are not without pose many difficulties. One of the main is linked to electromagnetic compatibility problems. Also, to study and quantify the generation and transmission of electromagnetic disturbances phenomena, we are interested in this work to define the EMC signature disturbances generated by a buck chopper. A the end of this study we showed that the studied converter constitutes a major source of disturbances at high frequencies while in low frequencies it is safe in EMC point of vue.*

**Keywords:** Electromagnetic compatibility (EMC) - Power electronics - Conducted disturbances - EMC standards - Chopper - Low frequency - High frequency.

### 1. INTRODUCTION

Les préoccupations actuelles en matière de compatibilité électromagnétique (CEM) imposent une caractérisation de plus en plus poussée des sources de nuisance en termes de pollution électromagnétique conduite et/ou rayonnée. La CEM est une discipline scientifique et technique qui trouve aujourd'hui sa justification dans les problèmes de cohabitation entre les systèmes industriels et leur environnement.

Ces problèmes ont certes toujours existé, mais ils deviennent aujourd'hui de plus en plus importants en raison de la concentration dans un même environnement d'appareils ou de systèmes dont les niveaux de puissance et de sensibilité sont très différents. Le rôle de la CEM est d'assurer à un système donné un degré d'immunité vis-à-vis de son

---

\* rezini\_s@yahoo.fr

† zinazzouz@yahoo.fr

environnement de façon à ce qu'il puisse fonctionner sans que ses performances ne soient affectées [1, 2].

Par ailleurs, l'électronique de puissance est devenue incontournable lorsque l'on parle de conversion d'énergie électrique. En effet, à l'heure actuelle, les convertisseurs statiques sont présents dans la quasi-totalité des systèmes électriques, que ce soit dans le domaine de la production d'énergie, des systèmes embarqués, des transports ou encore dans la vie de tous les jours.

Cette multiplication s'est accompagnée de problèmes de CEM. L'électronique de puissance utilise les semi-conducteurs de puissance en mode interrupteur. Ce fonctionnement confère aux convertisseurs un rendement très élevé. En revanche, il donne lieu à de nombreuses perturbations électromagnétiques (E.M) conduites et rayonnées. L'origine de ces dernières est liée aux variations des grandeurs électriques sur des courtes durées avec de fortes amplitudes et des fréquences élevées [3, 5, 6, 7].

L'origine des perturbations EM créées par un dispositif de conversion statique peut être appréhendée par une modélisation électrique de type 'circuit'. Celle-ci peut être utilisée pour simuler assez facilement le comportement CEM de la structure, en ce qui concerne les courants conduits grâce à des solveurs de type 'circuit' (MATLAB, PSpice, SABEUR, PSIM, PACTE ou autre) et, de façon plus approximative, lorsqu'il s'agit des champs rayonnés, ce qui nécessite d'intégrer les aspects géométriques du convertisseur et de l'environnement où l'on souhaite connaître l'intensité des champs rayonnés [3, 4]. Les objectifs de la modélisation CEM sont doubles à savoir [4]:

- La conception assistée par ordinateur (CAO) qui intègre les contraintes liées à la CEM, de façon à réduire les étapes de tests et de certification qui sont très coûteuses.
- L'analyse de phénomènes complexes dans les structures en vue d'améliorer leur fonctionnement.

L'hacheur est un convertisseur statique d'énergie électrique qui réalise la conversion de cette énergie d'une source continue vers une autre source continue. Il permet ainsi d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. Ce convertisseur peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les MOSFETS.

Le principe de ce convertisseur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur de puissance. Ce dernier doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [9].

Le présent travail est consacré à l'étude des perturbations E.M conduites basses et hautes fréquences engendrées par un hacheur abaisseur. Ainsi pour mettre en évidence les perturbations engendrées par ce convertisseur, nous avons effectué des simulations dans le domaine temporel suivies d'analyses fréquentielles, obtenues par analyse spectrale de Fourier.

Dans la section suivante, nous allons évoquer les normes utilisées en électronique de puissance, car les résultats que nous obtenons à l'aide des simulations effectuées sont comparés aux gabarits fournis par ces normes.

## **2. NORMALISATION CEM EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

Depuis plusieurs années, les fabricants d'appareils électriques et ou électroniques sont soumis à des normes de CEM dépendant de leurs produits et de leurs marchés d'affaires. Ces normes ont pour but de diminuer le risque de causer des problèmes d'interférences E.M. Il existe à ce jour un certain nombre de normes spécifiant les

exigences que doit satisfaire tout produit devant être connecté au réseau électrique de distribution.

Le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), créé par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), a reconnu la nécessité d'une forme de test qualité de la production et a incorporé des méthodes d'échantillonnage dans les standards d'émissions.

Afin de limiter les effets des perturbations EM basses fréquences sur les réseaux électriques, deux principales normes ont été mises en place à savoir la norme CEI et la norme IEEE établies respectivement par la Commission Électrotechnique Internationale CEI et le comité international relatif à l'institut IEEE.

Aussi, dans les **Tableaux 1** et **2**, suivants, nous présentons respectivement les limites des courants injectés dans le réseau électrique public basse tension et les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur ce même réseau selon la norme CEI-1000.

**Tableau 1:** Limites imposées par la norme CEI 1000-3-2 [11]

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang (n)	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang (n)	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq n \leq 40$	$0.23 * 8 / n$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 * 15 / n$		

**Tableau 2:** Limites imposées par la norme CEI 1000-2-2 [12]

Harmoniques multiples de 3		Harmoniques impaires multiples de 3		Harmonique paires	
Rang (n)	Tension harmonique en % du fondamental	Rang (n)	Tension harmonique en % du fondamental	Rang (n)	Tension harmonique en % du fondamental
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 0.5 * 25 / n$				

Pour le contrôle du taux de distorsion harmonique présent sur les réseaux électriques on doit utiliser la norme IEEE Std 519-2014. Cette norme détermine la procédure pour le contrôle des harmoniques présents sur le réseau. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique engendrée par les usagers et de la distorsion harmonique totale sur le réseau électrique.

Les **Tableaux 3** et **4** donnent respectivement les limites de distorsion de tension pour les fournisseurs d'énergie électrique (THD) ainsi que les limites de distorsion de courant pour les systèmes de distribution (TDD).

Les perturbations E.M hautes fréquences sont quantifiées par le niveau de leurs spectres en fréquence. En effet, les normes CEM imposent à certaines grandeurs électriques d’avoir un niveau de spectre inférieur à des limites exprimées en  $\text{dB}\mu\text{V}$ . Ces limites dépendent du domaine d’application de l’appareil

**Tableau 3:** Limites de distorsion de tension pour les fournisseurs d’énergie électrique [13]

Niveau de tension	Taux de distorsion individuel de tension (%)	Taux de distorsion global de tension THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V < 161.001 \text{ kV}$	1	1.5

La figure 1 montre les limites imposées par quelques normes CEM internationales applicables dans les domaines résidentiels, commerciaux et de l’industrie légère [10, 14-16].

**Tableau 4:** Limites de distorsion de courant pour les systèmes de distribution (120 V à 69 kV) [13]

Distorsion maximale du courant harmonique en pourcent du courant $I_L$						
$I_{sc} / I_L$	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
$I_{sc} / I_L < 20$	4	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < I_{sc} / I_L < 50$	7	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < I_{sc} / I_L < 100$	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < I_{sc} / I_L < 1000$	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$I_{sc} / I_L > 1000$	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit maximal.  $n$  : Rang d’harmonique.  
 $I_L$  : Courant maximal demandé par la charge.

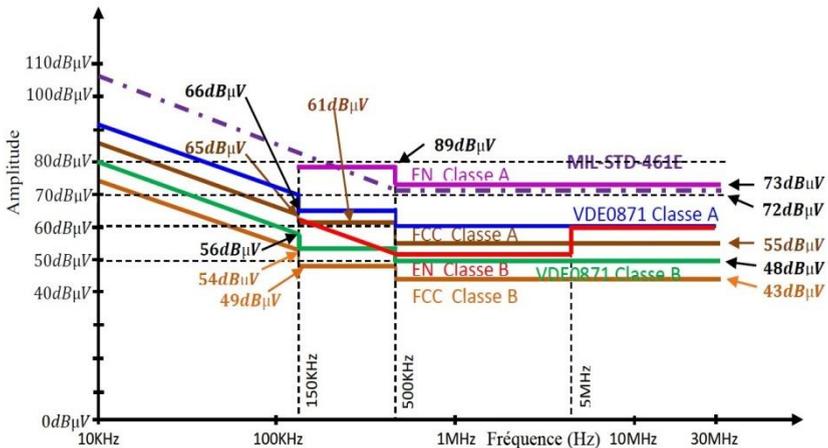


Fig. 1: Limites relatives aux émissions conduites [10, 14-16]

### 3. MISE EN EVIDENCE DE L'EFFET PERTURBATEUR D'UN HACHEUR ABAISSEUR SUR UNE SOURCE DE TENSION CONTINUE

Avec l'apparition de la génération dispersée, de plus en plus de convertisseurs statiques se retrouvent reliés aux réseaux électriques. Ils injectent la puissance électrique fournie par les générateurs, mais à la différence des systèmes électrotechniques classiques, ils introduisent également des perturbations basses et hautes fréquences.

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier, l'impact CEM d'un hacheur abaisseur à base de MOSFET sur une source de tension continue. Cette étude est réalisée sous environnement PSpice. Le convertisseur étudié est composé d'un MOSFET de type IRFP450 et d'une diode de référence BYT12P-600 et il fonctionne en mode de conduction discontinu. La charge est constituée d'une résistance placée en parallèle avec un condensateur.

#### 3.1 Perturbations en basses fréquences

Afin de mettre en évidence le principe de création des perturbations basse fréquence par le hacheur, nous avons considéré le modèle de base illustré dans la figure 2.

Ce modèle nous permet de déterminer le courant et la tension à l'entrée du hacheur. Les éléments parasites ne sont pas pris en considération. Les paramètres du circuit sont consignés dans le **Tableau** suivant:

**Tableau 5:** Paramètres du hacheur série

E (V)	$L_{\text{sou}}(\text{nH})$	$C_d(\text{mF})$	$F_c(\text{kHz})$	$\delta(\%)$	$R_{\text{ch}}(\Omega)$	$C_{\text{ch}}(\mu\text{F})$
100	10	2.2	100	90	50	900

Avec:  $\delta$ , le rapport cyclique du hacheur et  $F_c$ , la fréquence de commutation du MOSFET.

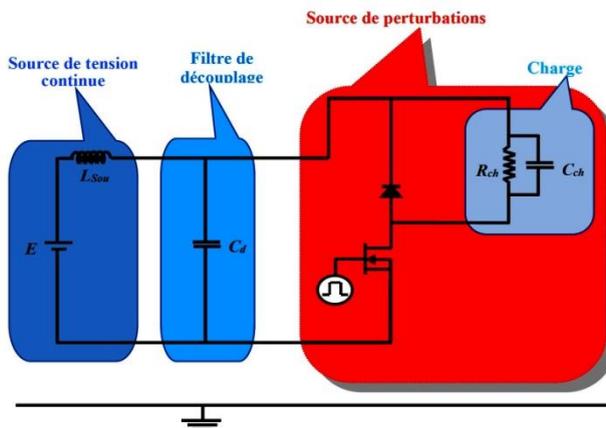


Fig. 2: Structure d'un hacheur abaisseur – Modèle basses fréquences

#### Résultats et analyse

Sur les figures 3-6, nous présentons, respectivement, les variations temporelles de la tension et du courant à l'entrée du hacheur ainsi que leurs spectres fréquentiels. L'analyse de ces variations temporelles, montre clairement la déformation des formes

d'ondes de tension et de courant à l'entrée du pont hacheur qui s'éloignent de la forme continue parfaite.

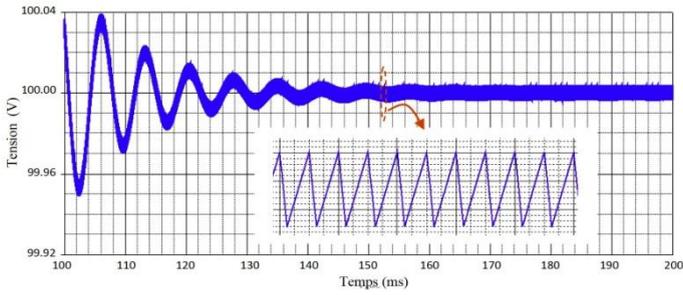


Fig. 3: Forme d'onde de la tension à l'entrée du hacheur

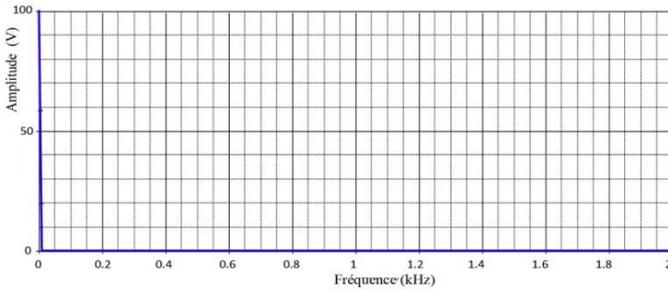


Fig. 4: Spectre fréquentiel de la tension à l'entrée du hacheur

Les principaux éléments responsables de cette déformation sont l'interrupteur de puissance (MOSFET) et l'inductance de la source d'alimentation.

Cependant, l'analyse spectrale de Fourier de ces formes d'ondes, montre l'absence d'harmoniques ce qui nous permet d'affirmer que ce type de convertisseur ne constitue pas une source de perturbations majeur en basses fréquences.

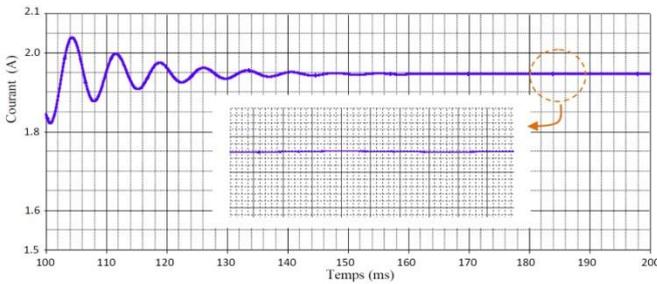


Fig. 5: Variations temporelles du courant à l'entrée du hacheur

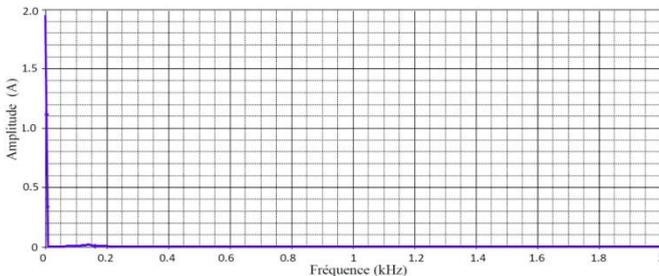


Fig. 6: Spectre fréquentiel du courant à l'entrée du hacheur

### 3.1.1 Influence de la fréquence de commutation du Mosfet sur le niveau de spectre des perturbations EM engendrées par le hacheur

Afin d'examiner l'influence de la fréquence de commutation ( $F_C$ ) sur le comportement CEM de la source de tension continue, nous avons considéré trois fréquences de commutation distinctes {  $F_C = 100 \text{ kHz}$ ,  $F_C = 200 \text{ kHz}$  et  $F_C = 1 \text{ MHz}$  } et nous avons relevé pour chaque fréquence, la tension et le courant à l'entrée du hacheur.

#### Résultats et analyse

Dans les figures 7 et 9, nous avons tracé les variations temporelles de la tension et du courant à l'entrée du hacheur pour les trois fréquences de commutations considérées. Les spectres fréquentiels correspondants à ces deux formes d'ondes sont présentés dans les figures 8 et 10.

L'analyse de ces variations temporelles et fréquentielles montre que l'augmentation de la fréquence de commutation n'a aucun effet sur les formes d'ondes et entraîne une légère élévation de l'amplitude de la tension (quelques mV), ainsi qu'une faible diminution de l'amplitude du courant (de l'ordre de quelques mA).

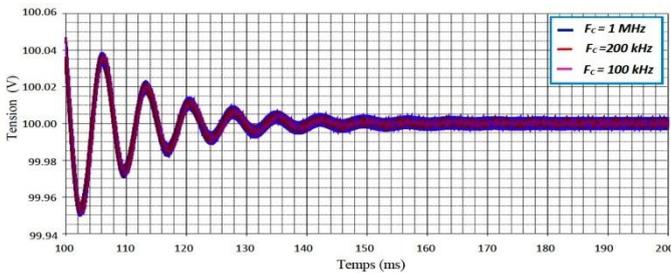


Fig. 7: Variations temporelles de la tension à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_C$

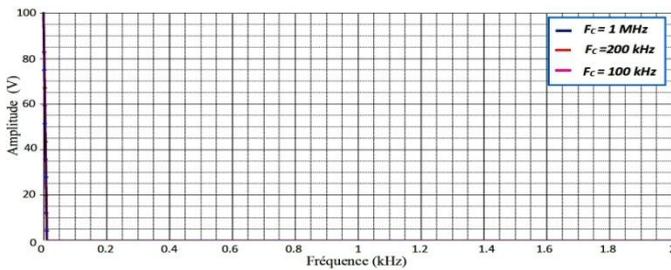


Fig. 8: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_C$

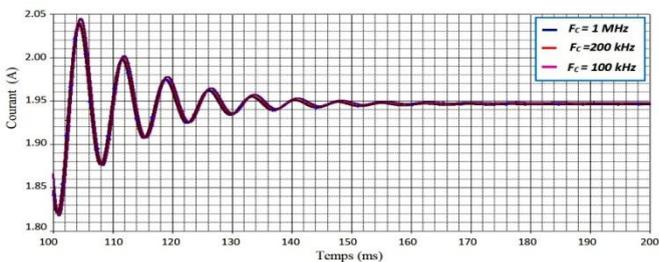


Fig. 9: Formes d'ondes du courant à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_C$

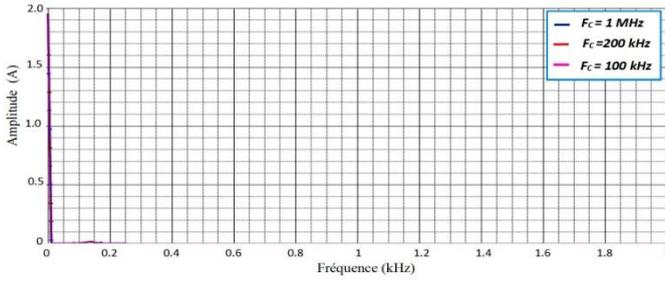


Fig. 10: Spectres fréquentiels du courant à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_c$

### 3.2 Perturbations EM hautes fréquences

Pour étudier les perturbations électromagnétiques hautes fréquences générées par le hacheur, nous allons présenter dans cette partie les deux principaux modes de propagation pour l'interférence électromagnétique (IEM) à savoir: le mode différentiel (MD) et le mode commun (MC). A ce stade, il est nécessaire de déterminer quelles sont les grandeurs électriques qui caractérisent le fonctionnement de ce convertisseur, sachant que les perturbations sont mesurées grâce au RSIL (réseau stabilisateur d'impédance de ligne).

Afin d'établir les équations relatives aux perturbations liées à ces deux modes de propagation dans un dispositif de puissance, un cas simple d'un générateur de perturbations conduites est présenté à la figure 11. Dans cette figure,  $V_N$  représente la tension perturbatrice.  $Z_1$  et  $Z_2$  représentent les impédances des chemins de propagation de bruit,  $Z_{c1}$  est l'impédance entre le dispositif et la terre.

Les résistances  $R_{c1}$  et  $R_{c2}$  représentent la charge du bruit. Ce sont des résistances normalisées ( $50\Omega$ ) aux bornes desquelles on effectuera la mesure des tensions parasites créées par ce dispositif [2].

La méthode des mailles est bien adaptée pour mettre en équation les courants perturbateurs traversant les lignes de puissance et la terre, ces derniers sont donnés par les équations (1) et (2) suivantes [17-20]:

$$i_1 = -i_{MC} + i_{MD} \quad (1)$$

$$i_2 = -i_{MC} - i_{MD} \quad (2)$$

$$i_G = 2i_{MC} \quad (3)$$

Les interférences EM sont évaluées par la tension ( $V_1$ ) aux bornes de la résistance  $R_{c1}$  et la tension ( $V_2$ ) aux bornes de la résistance  $R_{c2}$ ; ces deux tensions sont exprimées par les deux équations suivantes:

$$V_1 = R_C(-i_{MC} + i_{MD}) \quad (4)$$

$$V_2 = R_C(-i_{MC} - i_{MD}) \quad (5)$$

Avec,  $R_{c1} = R_{c2} = R_c$

Les perturbations en mode commun ( $V_{MC}$ ) et en mode différentiel ( $V_{MD}$ ) sont représentées par les relations (6) et (7) suivantes:

$$V_{MC} = -R_c i_{MC} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (6)$$

$$V_{MD} = R_c i_{MD} = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (7)$$

Les tensions  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_{MC}$  et  $V_{MD}$  sont liées par les relations suivantes:

$$V_1 = V_{MC} + V_{MD} \quad (8)$$

$$V_2 = V_{MC} - V_{MD} \quad (9)$$

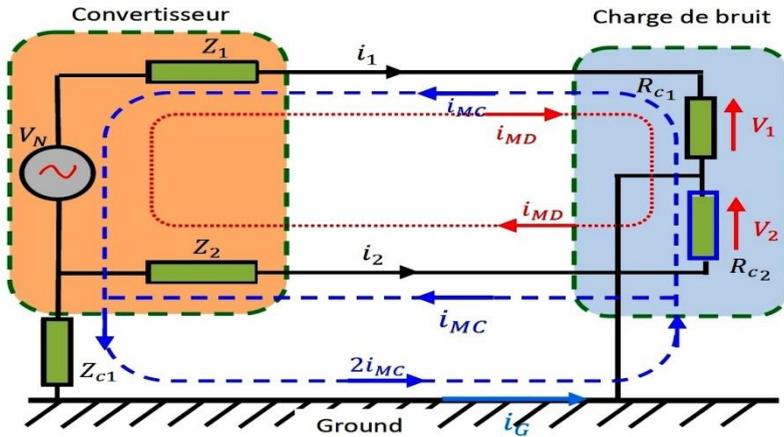


Fig. 11: Pollution en mode différentiel et en mode commun

A noter que pour des courants plus élevés traversant les éléments de puissance, un système de refroidissement est parfois nécessaire. Si ce dernier est relié à la terre du système pour des raisons de sécurité, des couplages capacitifs parasites apparaissent alors et peuvent provoquer des courants de mode commun. Les couplages capacitifs parasites les plus préjudiciables sont généralement associés aux potentiels qui peuvent évoluer brutalement.

Les capacités de mode commun associées au convertisseur sont représentées sur la figure 12 par  $C_p$ . Ainsi, dans ce mode les éléments parasites qui caractérisent les pistes du bus continu et la charge sont pris en considération. Les paramètres relatifs aux éléments parasites sont regroupés dans le tableau ci-après.

**Tableau 6:** Données du circuit étudié

$R_{p2}$ (m $\Omega$ )	$L_{p2}$ (nH)	$L_{p1}$ (nH)	$R_{p3}$ (m $\Omega$ )	$L_{p3}$ (nH)	$C_{p1}$ (pF)	$C_{p2}$ (pF)	$C_{p3}$ (pF)
450	10	50	40	40	100	20	110

## Résultats et analyse

Dans les figures 13-15, nous présentons respectivement les variations temporelles de la tension et du courant à l'entrée du hacheur et de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL.

En effet, cette dernière représente l'image des perturbations totales générées par le hacheur. Le spectre de cette tension est présenté dans la figure 16 sur laquelle nous avons tracé le gabarit des spécifications des normes relatives aux perturbations conduites (norme  $F_{CC}$ ).

Enfin, dans les figures 17 et 18, nous présentons les spectres des perturbations correspondant aux deux modes de propagation, le mode commun et le mode différentiel.

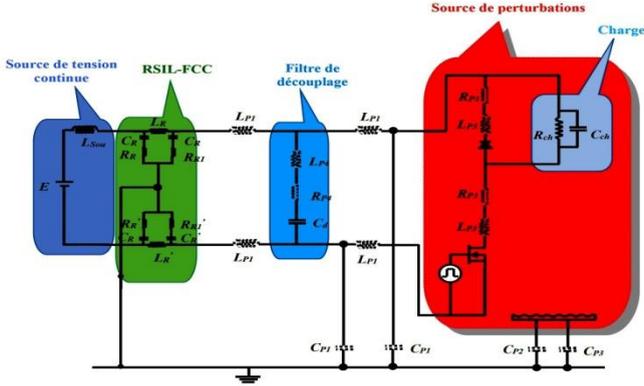


Fig. 12: Schéma électrique d'un hacheur abaisseur – Modèle hautes fréquences

L'analyse des différentes formes d'ondes obtenues, nous permet de constater l'effet perturbateur engendré par le hacheur sur la tension et le courant à son entrée. Cet effet se traduit par la distorsion des formes d'ondes suite aux variations brutales dues aux commutations du MOSFET (figures 13 et 14).

Par ailleurs, nous remarquons que la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL (figure 15) présente une variation rapide de son amplitude. D'autre part, l'analyse des variations spectrales des perturbations totales (figure 16) notamment la comparaison des amplitudes maximales de ces variations avec les niveaux limites normatifs {spécifiés par le gabarit tracé sur les mêmes graphes que ces variations spectrales} montre une certaine richesse en fréquences et un dépassement de ces limites.

Ceci nous amène à conclure que ce type de convertisseur doit comporter des systèmes de réduction des perturbations conduites qu'il génère sinon il constituera une menace pour les systèmes fonctionnant dans le même environnement. Quant à l'analyse de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL en mode commun et en mode différentiel (figure 17 et 18) elle a montré des spectres fréquentiels assez proches en amplitude.

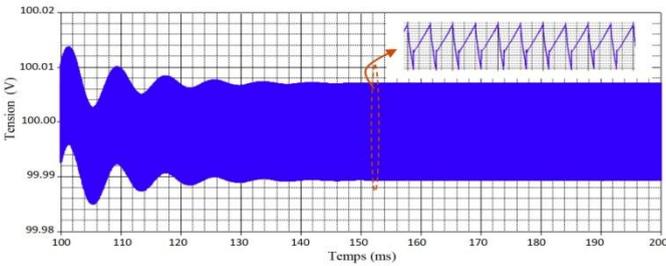


Fig. 13: Forme d'onde de la tension à l'entrée du hacheur

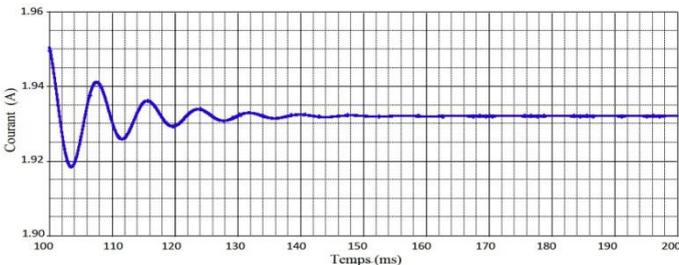


Fig. 14: Forme d'onde du courant à l'entrée du hacheur

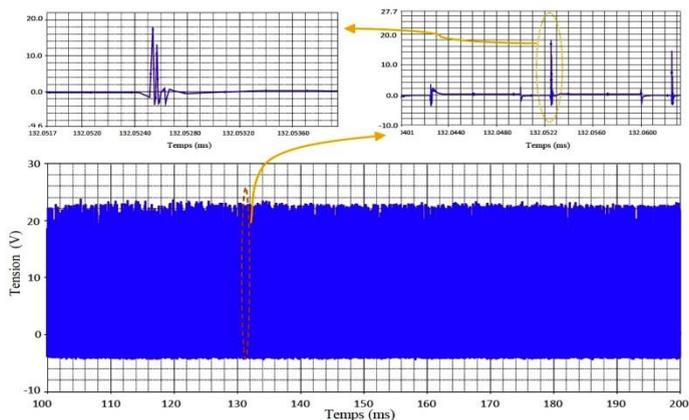


Fig. 15: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL

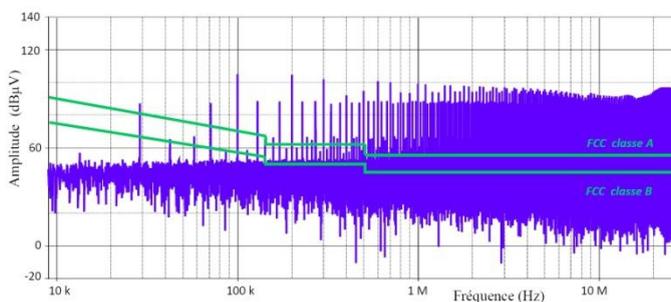


Fig. 16: Spectre fréquentiel des perturbations totales localisées sur le RSIL

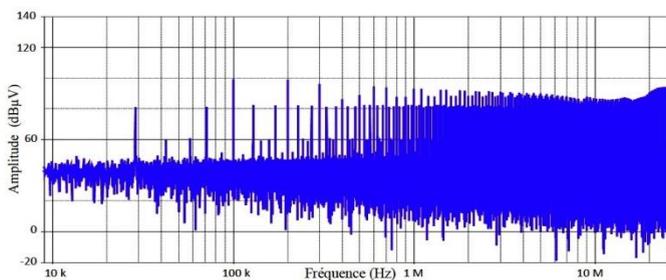


Fig. 17: Spectre fréquentiel des perturbations en mode commun localisées sur le RSIL

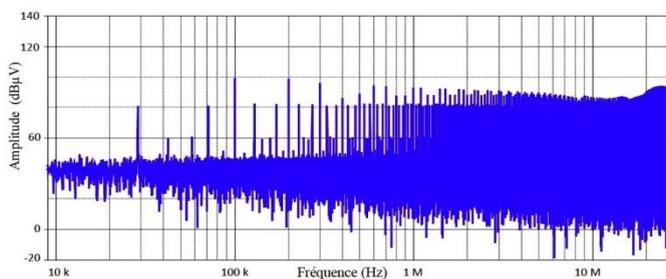


Fig. 18: Spectre fréquentiel des perturbations en mode différentiel localisées sr le RSIL

### 3.2.1 Influence de la fréquence de commutation sur les grandeurs d'entrée du hacheur

Afin d'examiner l'influence de la fréquence de commutation du Mosfet sur les grandeurs d'entrée du hacheur, nous avons effectué trois simulations correspondant à trois valeurs distinctes de la fréquence de commutation du Mosfet à savoir:  $F_c = 100 \text{ kHz}$ ,  $F_c = 200 \text{ kHz}$  et  $F_c = 1 \text{ MHz}$ . Les fréquences de commutation choisies sont les mêmes que celles utilisées en bases fréquences.

#### Résultats et analyse

Dans les figures 19 et 20, nous avons tracé les formes d'ondes de tensions et de courant à l'entrée du hacheur correspondant aux trois fréquences de commutation considérées.

L'analyse de ces formes d'ondes montre que l'augmentation de la fréquence de commutation entraîne un amortissement assez important des oscillations de la tension à l'entrée du hacheur contrairement au courant d'entrée sur lequel on observe une augmentation des amplitudes des oscillations du courant.

La forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL ainsi que le spectre fréquentiel correspondant, pour les trois fréquences considérées, sont présentés dans les figures 21 et 22. En analysant cette forme d'onde de tension, nous constatons une décroissance au niveau de l'amplitude de la tension en fonction de l'augmentation de la fréquence de commutation.

Par ailleurs, si on s'intéresse au spectre fréquentiel de cette tension et plus précisément dans la zone 2 {correspondant à la plage fréquentielle allant de 29 kHz à 30 MHz}, on remarque une diminution des amplitudes des fréquences significatives de ce spectre en fonction de l'augmentation de la fréquence de commutation. Toutefois, ces amplitudes sont au dessus des limites imposées par le gabarit normatif ( $F_{CC}$ ) ce qui constitue, sur le plan de la CEM, un inconvénient qu'il va falloir surmonter par des mesures de réduction des perturbations.

Dans la zone 1 {correspondant à la plage fréquentielle allant de 9 kHz à 29 kHz}, nous remarquons une légère augmentation (de quelques décibels) des amplitudes des fréquences du spectre fréquentiel. Cependant, cette augmentation reste en dessous des limites spécifiées par la norme ( $F_{CC}$ ) ce qui constitue, sur le plan de la CEM, un avantage ne nécessitant pas de mesures de réduction.

Pour finir, il est intéressant de noter que cette augmentation de la fréquence de commutation engendre des perturbations en mode rayonné ainsi que des pertes dues à la commutation elle-même.

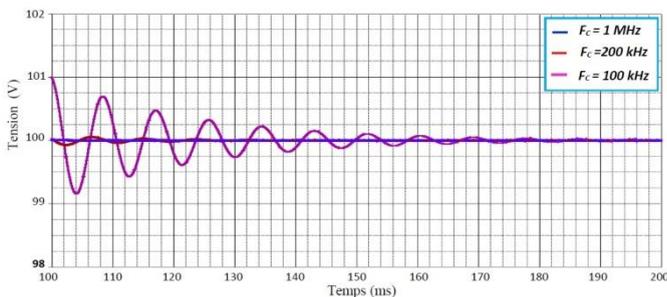


Fig. 19: Variations temporelles de la tension à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_c$

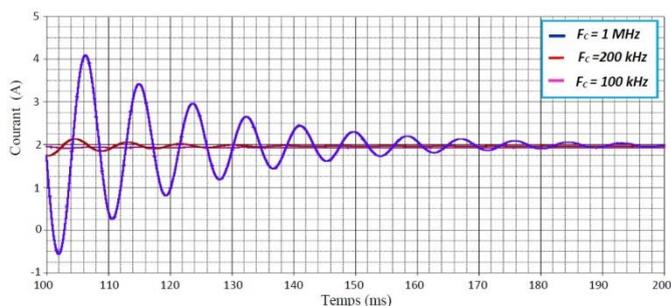


Fig. 20: Variations temporelles du courant à l'entrée du hacheur pour différentes valeurs de  $F_c$

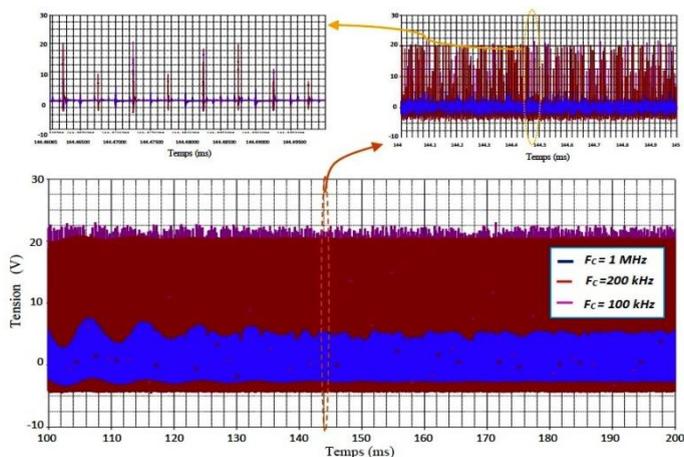


Fig. 21: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de  $F_c$

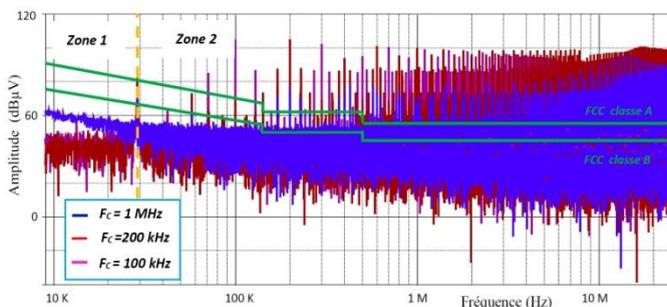


Fig. 22: Spectres fréquentiels des perturbations totales localisées sur le RSIL pour différentes valeurs de  $F_c$

#### 4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons mis en évidence la génération et la propagation de perturbations EM conduites issues d'un dispositif d'électronique de puissance à savoir: un hacheur abaisseur.

Cette mise en évidence s'est effectuée en basse et en haute fréquence et nous a permis d'affirmer que ce convertisseur ne constitue pas une source majeure de pollution

EM en basses fréquences alors qu'en hautes fréquence il agit comme une source significative de perturbations électromagnétiques pour son environnement.

## REFERENCES

- [1] H.W. Ott, '*Electromagnetic Compatibility Engineering*', Wiley, 2009.
- [2] F. Vaillant et J. Delaballe, '*La CEM: la Compatibilité Electromagnétique*', Cahier Technique N°149, Groupe Schneider, 1998.
- [3] S. Rezini, Z. Azzouz et B. Kouadri, '*Compatibilité Electromagnétique des Convertisseurs Statiques : Action par Conduction*', 5<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, USTO-MB, Oran, 10-11 Novembre, 2009.
- [4] F. Costa et G. Rujat, '*CEM en Electronique de Puissance- Sources de Perturbations, Couplage, SEM*', Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, D 3290.
- [5] F. Costa et G. Rujat, '*CEM en Electronique de Puissance- Réduction de Perturbations, Simulation*', Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, D 3292.
- [6] F. Costa, C. Gautier, E. Labouré et B. Revol, '*La Compatibilité Electromagnétique en Electronique de Puissance. Principes et Cas d'Etudes*', Hermes-science, Lavoisier, Paris, 2013.
- [7] J.L. Cocquerelle, '*CEM et Electronique de Puissance*', Editions Technip, Paris, 1999.
- [8] C. Marlier, '*Modélisation des Perturbations Electromagnétiques dans les Convertisseurs Statiques pour des Applications Aéronautiques*', Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2013.
- [9] H. Foch, Y. Cheron, R. Arches, B. Escaut, P. Marty et M. Metz, '*Conversion Continu- Continu, Hacheurs*', Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, D 3160.
- [10] T. Williams, '*EMC for Product Designer*', Fourth Edition, Published by Elsevier Ltd, 2007.
- [11] International standard, '*IEC 61000-3-2*', Third edition, 2005.
- [12] Copyright International Electrotechnical, '*Commission International*', Standard IEC 61000-2-2, 2002.
- [13] IEEE Std 519-2014, '*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*', 2014.
- [14] M. Rashid, '*Power Electronics Handbook. Devices, Circuits and Applications*', Third Edition, Elsevier Inc, All rights reserved, 2011.
- [15] S. Wang, '*Characterization and Cancellation of High-Frequency Parasitics for EMI Filters and Noise Separators in Power Electronics*', PhD, Electrical Engineering, Virginia, Polytechnic Institute and State University, 2005
- [16] L. Chen-Yao and L. Yung-Hui, '*Conduction EMI and Measure and Power Supply in NSRRC*', Accelerator Technology - Subsystems, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, pp. 1778 - 1780, 2009.
- [17] L. Bessoltane, S. Rezini et Z. Azzouz, '*Etude des Perturbations Electromagnétiques Générées par l'Association Redresseur - Hacheur. Filtrage CEM*', 1<sup>ère</sup> Conférence Internationale sur l'Electronique de Puissance et les Entraînements Electriques, USTO-MB, Oran, 2010.
- [18] P.V.Y. Jayasree, J.C. Priya, G.R. Poojita and G. Kameshwari, '*EMI Filter Design for Reducing Common-Mode and Differential-Mode Noise in Conducted Interference*', International Journal of Electronics and Communication Engineering, ISSN 0974-2166 Vol. 5, N°3, pp. 319 - 329, 2012.

- [19] K.M. Muttaqi and M.E. Haque, '*Electromagnetic Interference Generated from Fast Switching Power Electronic Devices*', International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 3, N°1, pp. 19 - 45, 2008.
- [20] G. Asmanis, '*Measurement and Modeling of EMI Filters High Frequency Parasitic Parameters*', PhD, Faculty of Power and Electrical Engineering, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Riga Technical University, 2014.