

# Analyse comparative des perturbations EM conduites BF engendrées par les ponts redresseurs triphasés commandés et non commandés

Salih Rezini <sup>#</sup>, Zin-eddine Azzouz <sup>\*</sup>

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

rezini\_s@yahoo.fr

<sup>\*</sup> *Département d'Automatique, Faculté de Génie Electrique Université des Sciences et de la technologie-Mohamed Boudiaf*

*Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques (LDEE)*

*El Mnaouar, B.P. 1505, Bir El Djir, 31000, Oran, Algérie*

zinazzouz@yahoo.fr

**Résumé**— La pollution électromagnétique (EM) est l'un des problèmes majeurs intervenant dans la dégradation de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques. Cette pollution est en partie créée par les dispositifs d'électronique de puissance notamment les convertisseurs statiques assurant certaines fonctions dans le réseau électrique. Ces dispositifs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des perturbations électromagnétique conduites et rayonnées très contraignantes du point de vue compatibilité électromagnétique (CEM).

Les travaux de recherche présentés dans cet article ont pour objectif l'étude et la caractérisation de la signature CEM des perturbations électromagnétique conduites basses fréquences engendrées par les ponts redresseurs triphasés non commandés et commandés. A noter enfin que tous les résultats de simulation, obtenus à l'aide du logiciel Pspice, ont été validés par des gabarits de normes spécifiques aux dispositifs étudiés.

**Mots-clés** — Compatibilité électromagnétique, électronique de puissance, pont redresseur, perturbation EM conduite, basses fréquences.

## I. INTRODUCTION

Le domaine du génie électrique ne cesse de gagner du terrain dans les domaines industriels. Cette tendance n'a fait que se renforcer depuis quelques années grâce aux progrès de l'électronique de puissance qui ont été considérables dans la maîtrise de la conversion et l'amélioration de la capacité de transit et de l'énergie électrique distribuée. Cette énergie qui est produite et distribuée sous forme de tensions sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges connectées au réseau électrique [1]–[4]. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, des perturbations EM peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux éléments raccordés au réseau et mettre ainsi en jeu des problèmes de CEM entre ces derniers [5]–[7].

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension et du courant délivrés par ces réseaux. Aussi, les dispositifs d'électronique de puissance

doivent être conformes aux normes CEM. Afin d'obtenir cette conformité, une méthode classique, consiste à réaliser un prototype, puis à mesurer ses émissions. On lui ajoutera enfin un filtre au niveau de son alimentation afin de limiter son niveau d'émission en dessous du gabarit imposé par la norme [8],[9].

Ce processus est long et coûteux, de plus, les filtres CEM sont lourds, volumineux et chers [10]. Cette méthode est loin d'être optimale car elle ne prend en compte la contrainte CEM qu'à la fin du développement du dispositif. Pour s'affranchir de ces inconvénients, il est intéressant d'intégrer la contrainte CEM dès la phase de conception en usant d'un outil de modélisation des perturbations EM. Ce dernier servirait à tester différentes configurations de dispositifs d'électronique de puissance et de choisir la moins polluante du point de vue CEM, sans pour autant arriver au stade de réalisation du dispositif [10].

Ainsi, ce travail est consacré à l'étude des perturbations EM conduites basses fréquences engendrées par les ponts redresseurs et transmises au réseau électrique. Pour mettre en évidence ces perturbations, des simulations dans le domaine temporel et fréquentiel ont été effectuées.

## II. 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 leurs marchés d'affaires. Ces normes ont pour but de diminuer le risque de causer des problèmes d'interférences EM. Il existe à ce jour un certain nombre de normes auxquelles doit se soumettre tout produit devant être connecté au réseau de distribution [11], [12].

A titre d'exemple, les normes CEI classe A 1000-3-2 et CEI classe A 1000-2-2 présentent respectivement les limites des courants injectés dans le réseau public basse tension et les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur ce même réseau [13]–[15].

Pour le contrôle du taux de distorsion harmonique (THD) présent sur les réseaux électriques, on doit utiliser la norme IEEE Std 519-2014 [16], [17]. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique engendrée par les usagers et de la distorsion harmonique totale sur le réseau électrique.

### III. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES PERTURBATION EM GENEREES PAR LES PONRS REDRESSEURS TRIPHASES

La notion de perturbations basses fréquences comprend les influences EM dans la gamme des fréquences comprises dans l'intervalle de 0Hz à 9kHz [18] – [20]. Ces perturbations sont causées par des utilisateurs possédant des appareils ayant des caractéristiques non-linéaires connectés au réseau d'alimentation.

Les ponts redresseurs monophasés présentent un intérêt très limité parce que les formes d'onde de la tension et du courant délivrés par ces derniers sont loin de la forme souhaitée (forme continue). En revanche, les ponts redresseurs triphasés permettent de redresser les courants et les tensions à une forme très proche de la forme continue. Les signaux redressés ont alors une ondulation de fréquence six fois supérieure à celle des tensions d'entrée et un taux d'ondulation très petit.

Dans ce paragraphe, nous allons examiner l'influence des perturbations EM créées par des ponts redresseurs triphasés non commandés et commandés. Cette étude passe par la mise en évidence et la caractérisation des perturbations basses fréquences générées par ces ponts redresseurs. Ainsi, nous étudions dans un premier temps, les perturbations produites par un pont redresseur triphasé à diodes. Nous étudions ensuite, les perturbations générées par un pont redresseur triphasé commandé (pont tout thyristors et pont mixte). Les diodes de redressement utilisées sont de type BYT12P-600 et les thyristors sont de type MCR3935-10.

Les thyristors fonctionnent avec un retard à l'amorçage de 30° par rapport à la conduction naturelle des diodes (amorçage naturel) dans les configurations de ponts considérées. A noter que le signal de commande des thyristors est de forme trapézoïdale.

Par ailleurs, afin de mettre en évidence le principe de création des perturbations basse fréquence, nous avons considéré le modèle de base illustré dans la figure ci dessous. Aussi, pour chaque pont redresseur nous avons tracé les variations temporelles et fréquentielles (analyse spectrale de Fourier) de la tension à l'entrée du pont et du courant de ligne.

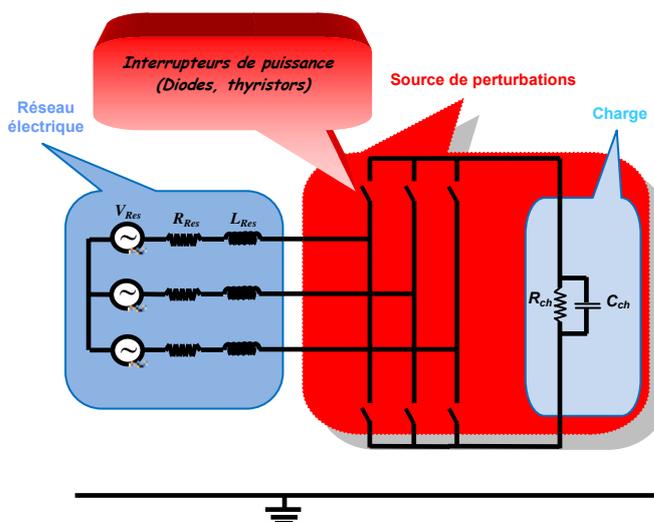


Fig. 1 Structure du pont de diode triphasé débitant sur une charge-Modèle basses fréquences

Les éléments parasites ne sont pas pris en considération et les paramètres de simulation considérés sont consignés sur le tableau 1.

TABLEAU I  
PARAMETRES DE SIMULATION UTILISES

$V_{Res}$ (V)	$R_{Res}$ ( $\Omega$ )	$L_{Res}$ ( $\mu H$ )	$R_{Ch}$ ( $\Omega$ )	$C_{Ch}$	
				Pont non commandé	Pont commandé
220	0.4	500	50	900 $\mu F$	900 nF

### Résultats et analyse

Les figures 2 et 3 représentent respectivement la tension à l'entrée du pont redresseur et le courant de ligne. Les analyses spectrales de Fourier de ces deux grandeurs sont présentées respectivement dans les figures 4 et 5.

L'analyse de ces résultats montre clairement l'effet perturbateur engendré par le pont redresseur triphasé (dans les trois configurations étudiées à savoir : le pont redresseur non commandé, le pont redresseur commandé tout thyristors et enfin le pont redresseur commandé mixte), et sa charge. Cet effet est traduit par une déformation des formes d'ondes de tension et du courant de ligne. De plus, on remarque que les formes d'ondes de tension et de courant de ligne obtenues, correspondant au pont redresseur commandé mixte, présentent une dissymétrie entre l'onde positive et l'onde négative.

Cette déformation se traduit, sur le plan fréquentiel, par l'apparition de plusieurs harmoniques. Nous constatons aussi que les harmoniques multiples de trois sont nuls pour les trois configurations de pont étudiées.

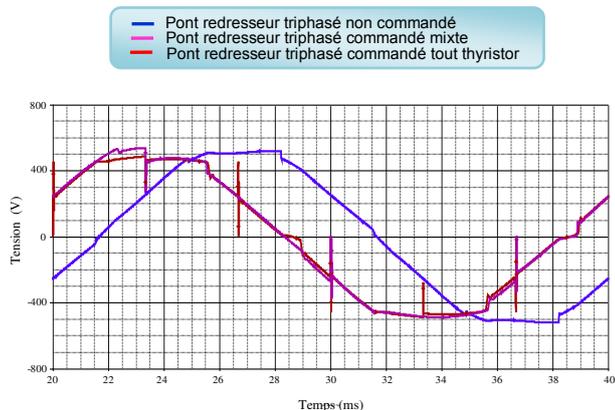


Fig. 2 Variations temporelles de la tension composée à l'entrée du pont redresseur triphasé

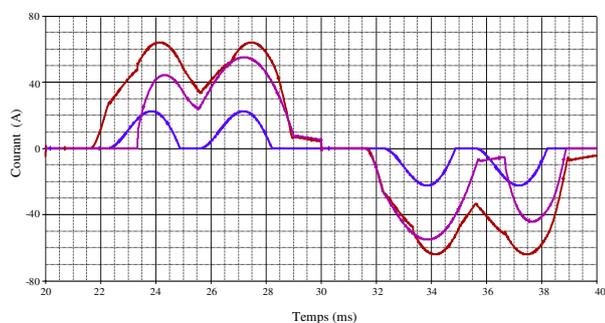


Fig. 3 Variations temporelles du courant de ligne du pont redresseur

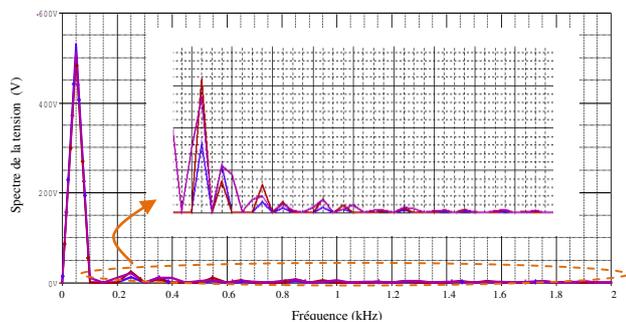


Fig. 4 Spectre fréquentiel de la tension composée à l'entrée du pont redresseur triphasé

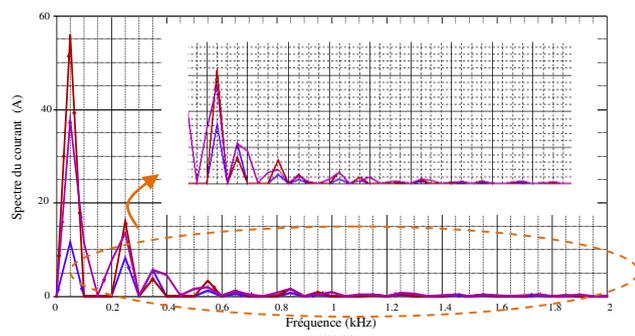


Fig. 5 Spectre fréquentiel du courant de ligne

Dans les tableau II et III, nous avons reporté, pour chaque configuration, les valeurs du THD, du TDD et du fondamental obtenues. Les valeurs du THD et du TDD sont comparées et validées par les données de la norme IEEE 519-2014.

TABLEAU II  
 TABLEAU COMPARATIF DES VALEURS DU THD, TDD ET DE L'AMPLITUDE DU FONDAMENTAL RELATIF AU PONT REDRESSEUR NON COMMANDE

<b>Tension à l'entrée du pont</b>	Fondamental (V)		530.5
	THD (%)	Simulation	3.45
		Norme (IEEE std 519-2014)	8
<b>Courant de ligne</b>	Fondamental (A)		11.61
	TDD (%)	Simulation	86.92
		Norme (IEEE std 519-2014)	12

TABLEAU III  
 TABLEAU COMPARATIF DES VALEURS DU THD, TDD ET DE L'AMPLITUDE DU FONDAMENTAL RELATIF AU PONT REDRESSEUR COMMANDE

		<b>Tout thyristors</b>	<b>Mixte</b>
<b>Tension à l'entrée du pont</b>	Fondamental (V)		497.8
	THD (%)	Simulation	5
		Norme (IEEE std 519-2014)	8
<b>Courant de ligne</b>	Fondamental (A)		55.98
	TDD (%)	Simulation	29.92
		Norme (IEEE std 519-2014)	8

A la lumière de ces, il est facile de voir l'effet perturbateur engendré par le pont redresseur triphasé, sur le courant de ligne et la tension à l'entrée du pont. Ainsi, l'analyse du THD montre que la valeur de ce paramètre dans les configurations de ponts est inférieure à la valeur limite du THD spécifiée par la norme IEEE 519-2014.

De plus, nous constatons que l'amplitude du fondamental, correspondant à la tension à l'entrée du pont redresseur, est en dessous de l'amplitude de la tension fournie par le réseau électrique. Par ailleurs, l'analyse du TDD dans les trois cas de configurations de pont étudiées, montre que ce dernier dépasse largement les limites recommandées par la norme IEEE 519-2014.

Enfin nous remarquons, que le pont redresseur triphasé non commandé est moins polluant que le pont redresseur triphasé commandé (tout thyristors, mixte). En effet, les valeurs obtenues du THD et du TDD, correspondant au pont redresseur non commandé, sont inférieures à celles du pont redresseur commandé (tout thyristors, mixte) ce qui justifie les valeurs trouvées du fondamental.

#### IV. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans cet article est une contribution à l'identification et la caractérisation des perturbations EM engendrées par les dispositifs d'électronique de puissance. L'apport de ce travail concerne l'étude des agressions électromagnétiques conduites basses fréquences générées par les ponts redresseurs triphasés commandés et non commandés transmises au réseau électrique.

Les résultats obtenus après simulation, nous ont permis de mettre en évidence les sources et les chemins de propagation des perturbations engendrées par ces convertisseurs. Ces résultats ont été comparés et validés par des gabarits de normes CEM relatifs aux dispositifs étudiés. Nous avons montré dans cette étude que les ponts redresseurs constituent, en basses fréquences, une source non négligeable de perturbations dont l'origine est due au fonctionnement des diodes et des thyristors.

#### REFERENCES

- [1] E. Félice and P. Révilla, *Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique*, Dunod, L'Usine Nouvelle, 2009.
- [2] A. M. Abu-Jalala, T. Cox, C. Gerada, M. Rashed, T. Hamiti and N. Brown, "Power Quality Improvement of Synchronous Generators Using an Active Power Filter," IEEE Transactions on Industry Applications, pp 4080 - 4090, Vol.54, Issue.5, 19 April, 2018.
- [3] C. Sankaran, *Power quality*, International standard book, Library of Congress card, Printed in the United States of America, 2002.
- [4] L. Angela, N. P. Gabriel and M. D. Corina, "The influence of home nonlinear electric equipment operating modes on power quality," Wseas transactions on systems, pp 357 - 367, E-ISSN: 2224-2678, Vol. 13, 2014.
- [5] R. Calvas, *Les perturbations électriques en BT*, Cahier technique n° 141, Groupe Schneider, 2001.
- [6] M. Deobarro, "Etude de l'immunité des circuits intégrés face aux agressions électromagnétiques : proposition d'une méthode de prédiction des couplages des perturbations en mode conduit," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.  
S. Rezini, Z. Azzouz et B. Kouadri, "Compatibilité électromagnétique des convertisseurs statiques : action par conduction," 5<sup>ème</sup> Conférence internationale sur électrotechnique, USTO-MB, Oran, 10-11 Novembre, 2009.
- [7] P. M. Nicolae, I.D. Nicolae and M.Ş. Nicolae, "Electromagnetic compatibility and power quality problems at low frequency for loads from an urban transportation system and in a power substation," IEEE International EMC Symposium, pp 242 - 247, Colorado Denver, 5-9 Aug, 2013.
- [8] F. Costa, C. Gautier, E. Labouré and B. Revol, *La compatibilité électromagnétique en électronique de puissance. Principes et cas d'études*, Hermes-science, Lavoisier, Paris, 2013.
- [9] S. Rezini, "Contribution à l'étude et à la caractérisation de perturbations EM engendrées par des dispositifs d'électronique de puissance affectant un réseau électrique," Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie-MB, 2016.
- [10] C. Marlier, "Modélisation des perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques pour des applications aéronautiques," Thèse de doctorat, Université de Lille I, 2013.
- [11] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [12] A. M. Abu-Jalala, T. Cox, C. Gerada, M. Rashed, T. Hamiti and N. Brown, "Power Quality Improvement of Synchronous Generators Using an Active Power Filter," IEEE Transactions on Industry Applications, pp 4080 - 4090, Vol.54, Issue.5, 19 April, 2018.
- [13] International standard, *IEC 61000-3-2*, Third edition, 2005.
- [14] G. Edful, A. Jackson, J. E Cole, "Harmonic emission limits and selecting PCC location based on the type of distribution system," Proceedings of the world congress on engineering, Vol I, pp 301-306, July 2-4, London, 2014
- [15] Copyright International Electrotechnical, *Commission International*, Standard IEC 61000-2-2, 2002.
- [16] IEEE Std 519-2014, *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*.
- [17] P. Thakur, "Nonlinear load distribution and drives configuration selection for harmonic mitigation as per IEEE 519-2014 standard," International conference on power electronics, drives and energy systems (PEDES), 18-19 December, India, 2018.
- [18] J. L. Cocquerelle, *CEM et électronique de puissance*, Editions Technip, Paris, 1999.
- [19] R.T.Kennedy and I. Daut, "Power quality and electromagnetic compatibility-The simple or not so simple ubiquitous power supply input stage," 2<sup>nd</sup> International conference on power and energy (PECon 08), 1-3 December, Malaysia, 2008.
- [20] C. Beiu, N. Golovanov, R. Porumb and C. Toader, "Power quality in relation to the requirements of electromagnetic compatibility," 5<sup>th</sup> International symposium on electrical and electronics engineering (ISEEE), 20-22 October, Romania, 2017.