



**HAL**  
open science

# **Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible**

Damien Guilbert

## ► To cite this version:

Damien Guilbert. Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. ⟨hal-01083930⟩

**HAL Id: hal-01083930**

**<https://hal.science/hal-01083930v1>**

Submitted on 18 Nov 2014

**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.



HAL Authorization

# Dimensionnement des composants magnétiques d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé tolérant aux défauts pour des applications véhicule électrique à pile à combustible

Damien GUILBERT

IRTES-SET, UTBM, 90010 BELFORT Cedex

Fédération de Recherche CNRS FCLab (FR CNRS 3539), Rue Thierry Mieg, 90010 BELFORT

*damien.guilbert@utbm.fr*

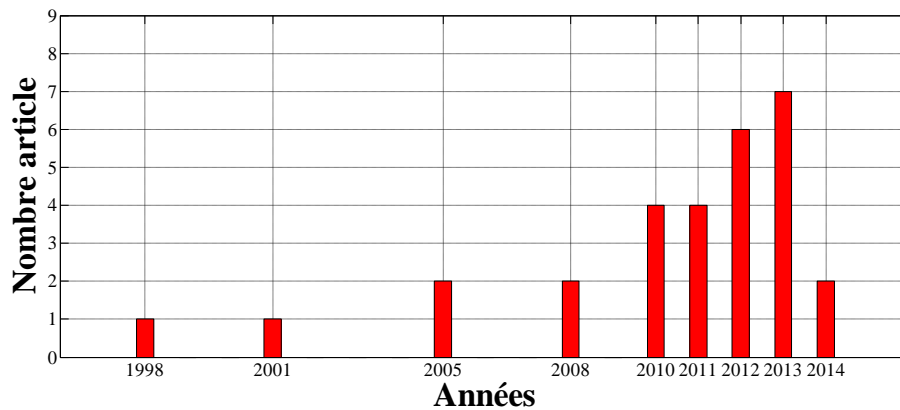
**RESUME** – Ces dernières années, la tolérance aux défauts a profité d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique internationale, en particulier pour les convertisseurs DC/DC. Dans le cas des convertisseurs DC/DC, la tolérance aux défauts se présente sous deux formes : une architecture et/ou une stratégie de contrôle tolérant aux défauts. Dans cet article, l'étude se concentre sur un convertisseur DC/DC entrelacé offrant une architecture naturelle tolérante aux défauts. Ces convertisseurs doivent répondre à de nombreuses exigences dans les applications véhicule électrique à pile à combustible en termes de masse, volume, ondulation de courant d'entrée et efficacité énergétique. Dans une optique de conception optimale du convertisseur DC/DC, ces aspects doivent être pris en compte. L'objectif de cet article est d'évaluer l'impact des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des composants magnétiques par rapport à un fonctionnement normal. Les aspects ondulation de courant, efficacité énergétique et saturation du circuit magnétique seront particulièrement analysés lors des fonctionnements en mode dégradé.

**ABSTRACT** – In recent years, fault tolerance has gained a growing interest from the international scientific community, particularly for DC/DC converters. In the case of DC/DC converters, fault tolerance is carried out by two main forms: a fault tolerant architecture and/or fault tolerant control strategy. In this paper, the study is focused on an interleaved DC/DC boost converter offering an architecture naturally fault tolerant. These converters must respond to challenging issues in fuel cell electric vehicle applications in terms of weight, volume, input current ripple and energy efficiency. From the perspective to optimal design of DC/DC converter, these challenging issues must be taken into account. The purpose of this paper is to assess the impact of degraded operating mode on the sizing of the magnetic components compared with a normal operating mode. Aspects current ripple, energy efficiency, and saturation in the magnetic circuit would be particularly analyzed during degraded operating mode.

**MOTS-CLES** – Pile à combustible, Convertisseur DC/DC boost entrelacé, Fonctionnement en mode dégradé, Ondulation de courant, Dimensionnement.

## 1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les progrès dans la technologie de l'électronique de puissance a permis de développer l'utilisation des convertisseurs de puissance dans une large gamme d'applications incluant les véhicules électriques. Dans de telles applications critiques, un haut niveau de fiabilité est nécessaire. Les convertisseurs de puissance jouent un rôle essentiel dans le maintien d'un fonctionnement normal pour tous les types de transport électrifié, incluant les véhicules électriques à pile à combustible. En effet, pendant le fonctionnement, le convertisseur peut être soumis à des défauts au niveau des interrupteurs de puissance, des capteurs de mesures qui peuvent avoir des effets indésirables sur le système [1]. Dans le cadre de ce travail de recherche, seuls les défauts d'interrupteurs de puissance sont examinés. Les défauts les plus communs dans les interrupteurs de puissance sont les défauts de circuit-ouvert, de commande et de court-circuit [2]. En outre, les défauts de circuit-ouvert peuvent être une conséquence des défauts de court-circuit si et seulement si les fusibles fondent avant qu'un défaut de court-circuit endommage le système [3]. Dans cette étude, les défauts de circuit-ouvert sont considérés. Une fois que le défaut a été détecté, l'arrêt du convertisseur doit être évité. Pour assurer une continuité de service et/ou réduire les effets indésirables des modes dégradés, une architecture de convertisseur DC/DC et/ou une stratégie de contrôle tolérant aux défauts doivent être utilisées. En raison de l'importance des défauts d'interrupteur de puissance, de nombreux chercheurs ont publié des articles sur le diagnostic des défauts d'interrupteur de puissance. L'histogramme représenté sur la Figure 1, montre l'évolution du nombre d'articles [4] concernant les méthodes de diagnostic de défauts d'interrupteur de puissance. Cette évolution souligne que le diagnostic des défauts dans les convertisseurs DC/DC est un sujet émergent en électronique de puissance. En outre, des fonctionnements en mode dégradé ont une incidence sur le dimensionnement des composants du convertisseur, en particulier les composants magnétiques [1].



**Figure 1 : Evolution du nombre d'article sur le diagnostic des défauts d'interrupteurs de puissance dans les convertisseurs DC/DC [4]**

Jusqu'à présent, les composants magnétiques des convertisseurs DC/DC sont dimensionnés pour des fonctionnements en mode sain [4]-[7] sans prendre en considération les effets des modes dégradés [1], [8]. C'est pourquoi, dans ce travail de recherche, une étude est portée sur l'évaluation des impacts des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des composants magnétiques par rapport à un fonctionnement normal. Par la suite, l'architecture du véhicule électrique à pile à combustible ainsi que du convertisseur DC/DC est présentée dans la section 2. Ensuite, des instructions sont données dans la section 3 pour aider au dimensionnement des éléments magnétiques en termes de volume, masse, ondulation de courant d'entrée et pertes. Après, une description du banc expérimental est présentée ainsi qu'une analyse de l'effet des modes dégradés dans la section 4. Enfin, une synthèse est présentée dans la section 5 afin d'exposer l'effet des modes dégradés sur le dimensionnement des inductances.

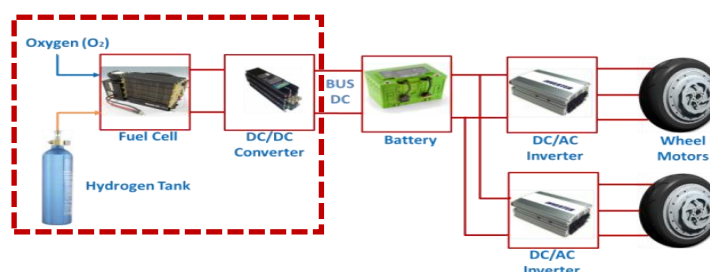
## 2. Architecture d'un véhicule électrique à pile à combustible et du convertisseur DC/DC

### 2.1 Présentation de l'architecture du véhicule électrique à pile à combustible

Un véhicule électrique à pile à combustible a besoin d'un grand nombre de composants comme cela est montré sur la Fig. 2 illustrant un exemple d'architecture d'une chaîne de traction, parmi lesquelles :

- 1) Une pile à combustible (PàC) à membrane échangeuse de protons ;
- 2) Des convertisseurs de puissances incluant un convertisseur DC/DC et deux convertisseurs DC/AC ;
- 3) Deux moteurs roues électriques ;
- 4) Un pack de 4 batteries.

Dans le cas sous étude, des batteries de faible tension (i.e. 51V pour le pack de batteries) sont utilisés pour assister à la propulsion du véhicule durant les phases transitoires et pour absorber l'énergie cinétique pendant les phases de freinage régénératif. Dans le cadre de ce travail de recherche, seul la pile à combustible et le convertisseur DC/DC associé sont pris en considération comme cela est souligné sur la Figure 2. Les raisons pour lesquelles la pile à combustible est prise en considération dans cette étude, sont données dans la section 3.



**Figure 2 : Exemple d'architecture d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique à pile à combustible [9]**

### 2.2 Présentation et bénéfices du convertisseur DC/DC boost entrelacé

En s'appuyant sur les exigences des convertisseurs DC/DC pour les applications véhicule électrique à pile à combustible [10], il a été décidé de concentrer cette étude sur un convertisseur DC/DC boost entrelacé. La

représentation schématique du convertisseur associé à la pile à combustible est illustrée sur la Fig. 3. Cette topologie présente de nombreux avantages comparés aux autres topologies de convertisseur DC/DC pour des applications véhicule électrique à pile à combustible [10], incluant compacité, haute efficacité énergétique, ondulation de courant d'entrée réduite, et prédisposition aux fonctionnements en mode dégradé (i.e. présence de défauts) [11]. Le nombre de phase de ce convertisseur a été choisi en se basant sur quatre critères incluant la réduction de l'ondulation du courant de la pile à combustible (PàC), réduction du volume des inductances, réduction du courant RMS du condensateur de sortie et l'efficacité énergétique [11]. En raison de la redondance statique naturelle de cette topologie, les phases saines peuvent être utilisées en cas de défauts d'interrupteur de puissance, comme un système de compensation évitant par conséquent une interruption de fourniture d'énergie [11]. Afin de satisfaire les exigences de la tolérance aux défauts, des fusibles (F1, F2, F3) ont été ajoutés en série avec chaque interrupteur de puissance comme cela est illustré sur la Figure 3. Les fusibles permettent d'isoler la phase défectueuse en cas de défaut de court-circuit sur les interrupteurs de puissance. Afin de faciliter l'étude, le reste de la chaîne de traction est considéré comme une charge résistive.

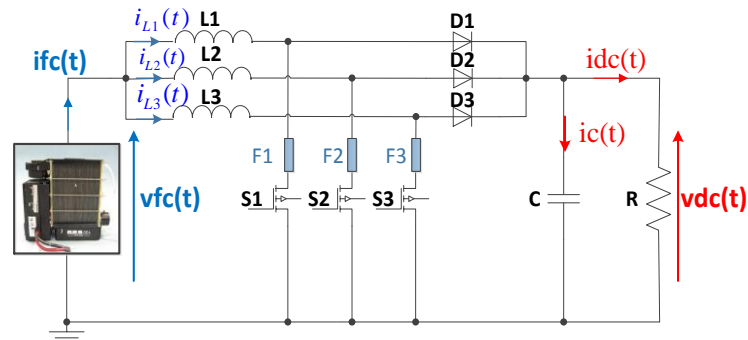


Figure 3 : Architecture d'un convertisseur DC/DC boost entrelacé associé à la pile à combustible

### 3. Instructions pour aider au dimensionnement des inductances

#### 3.1 Géométrie et volume d'une inductance

Le concept d'entrelacement permet d'augmenter l'ondulation du courant dans chaque phase et par conséquent de diminuer la valeur et le volume de l'inductance. En effet, en diminuant à la fois la valeur de l'inductance et le courant la traversant, cela permet la réduction du volume, poids, coût et de l'énergie maximale stockée. En raison du fait qu'il n'y a pas besoin d'un matériau magnétique avec une induction à saturation élevée, la ferrite peut être utilisée comme matériau magnétique pour le noyau de l'inductance, dont son induction de saturation varie entre 0.25 et 0.5T et possède un coût plus faible comparé à d'autres noyaux magnétiques [12]. Par ailleurs, le matériau en ferrite présente de faibles pertes dans le noyau magnétique [12]. La Figure 4 montre la vue de face et de dessus de l'inductance.

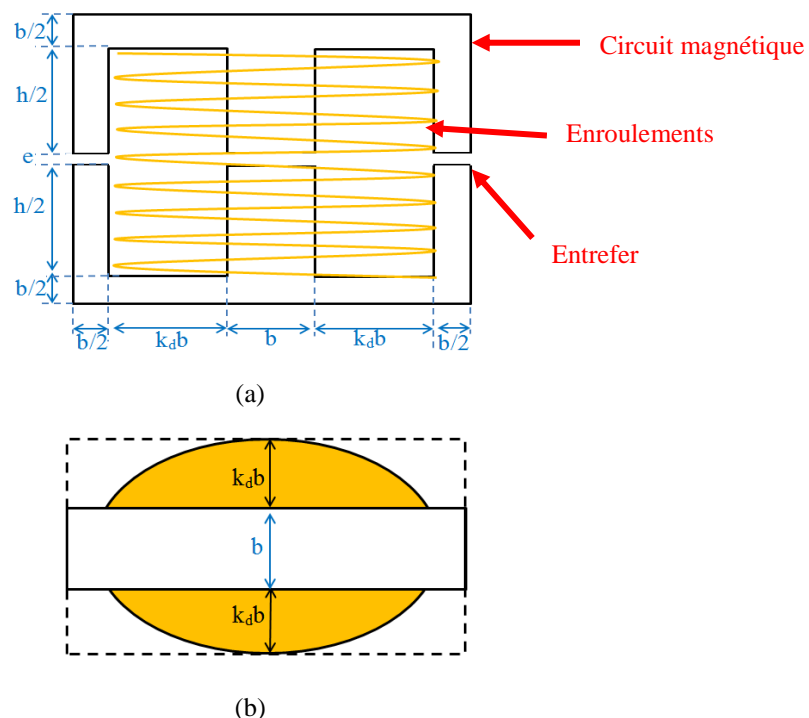


Figure 4 : Vue de face et de dessus de l'inductance

L'énergie maximale qui peut être stockée dans une inductance est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{1}{2} L I_{L_{\max}}^2 \quad (1)$$

Le volume de la géométrie montrée sur la Figure 4 est donné par l'expression suivante :

$$V = (b + 2k_d b)(2b + 2k_d b)(h + b + e) \quad (2)$$

Ce volume peut être exprimé sous une forme différente en prenant en compte les caractéristiques géométriques du noyau [13] :

$$V = \left(\frac{2}{K_d^{3/4}}\right)(1 + k_d)\left(1 + \frac{K_d}{k_d}\right)(1 + 2k_d) A^{3/4} \quad (3)$$

Où :

$$K_d = \frac{S_B}{S_F} \quad (4)$$

$$A = \frac{K_B L I_{L_{\max}} I_{L_{\text{eff}}}}{J B_M} \quad (5)$$

Le coefficient  $S_B$  représente la surface bobinaable de l'inductance ; tandis que  $S_F$  représente la surface du noyau magnétique. Le coefficient  $K_B$  représente le coefficient de remplissage du bobinage,  $I_{L_{\text{eff}}}$  représente le courant efficace de l'inductance,  $J$  est la densité de courant,  $B_M$  est l'induction magnétique et enfin  $A$  représente le produit entre  $S_B$  et  $S_F$ .

### 3.2 Détermination de la valeur de l'inductance

Dans notre cas d'étude, la valeur de l'inductance  $L$  est calculée par l'équation suivante :

$$L = \frac{V_{dc} (3D - 1)(2 - 3D)}{3 \Delta i_{fc} F_s} \quad (6)$$

Où  $D$  représente le rapport cyclique du convertisseur. En outre, la valeur de  $L$  a été déterminée à la tension nominale ( $V_{dc}=26V$ ) de la PàC et pour une fréquence de commutation ( $F_s=20kHz$ ). Afin de garantir un mode de conduction continue, l'ondulation de courant dans une inductance de phase doit respecter la condition suivante :

$$\Delta i_L \leq \frac{i_{fc}}{N} \quad (7)$$

Où  $N$  est le nombre de phase du convertisseur. L'ondulation dans une inductance de phase,  $\Delta i_L$  est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta i_L = \frac{V_{dc} D (1 - D)}{L F_s} \quad (8)$$

### 3.3 Evaluation des pertes dans l'inductance

Les pertes dans l'inductance incluent les pertes Joule ou cuivre ( $P_{\text{cop}}$ ), qui sont causés par l'effet de peau et de l'effet de proximité, et les pertes dans le noyau magnétique ( $P_{\text{core}}$ ), qui sont causées par le phénomène d'hystérésis et des courants de Foucault. Tout d'abord, les pertes dans le noyau magnétique peuvent être calculées à partir de l'équation de Steinmetz [14] :

$$P_{\text{core}} (mW) = a (F_s)^b (B_M)^c m \quad (9)$$

Où  $a$  est une constante dépendant du matériau du noyau magnétique,  $b$  est l'exposant de la fréquence,  $c$  est l'exposant de l'induction et enfin  $m$  est le poids du circuit magnétique en kg. Dans notre étude,  $a$  est égal à 6.5,  $b$  est égal à 1.51 et enfin  $c$  est égal à 1.74.

Par comparaison, les pertes Joule sont déterminées par l'expression suivante :

$$P_{\text{cop}} = R_L \left( \left( \frac{i_{fc}}{N} \right)^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \right) \quad (10)$$

Où  $R_L$  est la résistance équivalente série de l'inductance et peut-être calculée en utilisant l'expression suivante :

$$R_L = \rho_{cu} \frac{l_{cu}}{S_{cu}} \quad (11)$$

$\rho_{cu}$  est la résistivité du cuivre,  $S_{cu}$  représente la section du fil de cuivre et enfin  $l_{cu}$  est la longueur total du fil de cuivre.

## 4. Analyse de l'impact des défauts sur les composants magnétiques

### 4.1 Description du banc de test expérimental

Afin de réaliser une étude approfondie sur l'impact des défauts d'interrupteur de puissance sur le dimensionnement des inductances, des essais expérimentaux ont été effectués. Le convertisseur DC/DC boost entrelacé et le banc de test expérimental sont illustrés sur la Figure 5. Chaque phase du convertisseur possède un capteur de courant à effet Hall pour des objectifs de contrôle en mode sain et dégradé [1]. Le courant de référence dans chaque phase est généré par une carte de temps réel dSPACE DS1104. Par comparaison, la tension du bus DC est mesurée via un capteur de tension pour des objectifs de contrôle. Le système de contrôle développé dans l'environnement Matlab/Simulink a été transféré via le logiciel ControlDesk. Les trois signaux de commande MLI sont générés par un bloc générateur de signaux MLI fourni par la librairie dSPACE dans l'environnement Matlab/Simulink. Cependant, ces signaux MLI ne sont pas décalés les uns par rapport aux autres. Le concept d'entrelacement du convertisseur est garanti par la connexion en parallèle de N convertisseurs boost et par le décalage temporel des signaux de commande MLI des trois interrupteurs de puissance (S1, S2, S3). Dans le cadre de ce travail de recherche, les signaux de commande MLI sont décalés l'un par rapport à l'autre au moyen d'une carte FPGA. Le convertisseur DC/DC entrelacé a été testé en utilisant une source d'alimentation idéale, qui a les mêmes caractéristiques (i.e. tension et courant) que la pile à combustible considérée. Les caractéristiques du système pile à combustible et convertisseur sont résumées dans le tableau 1.

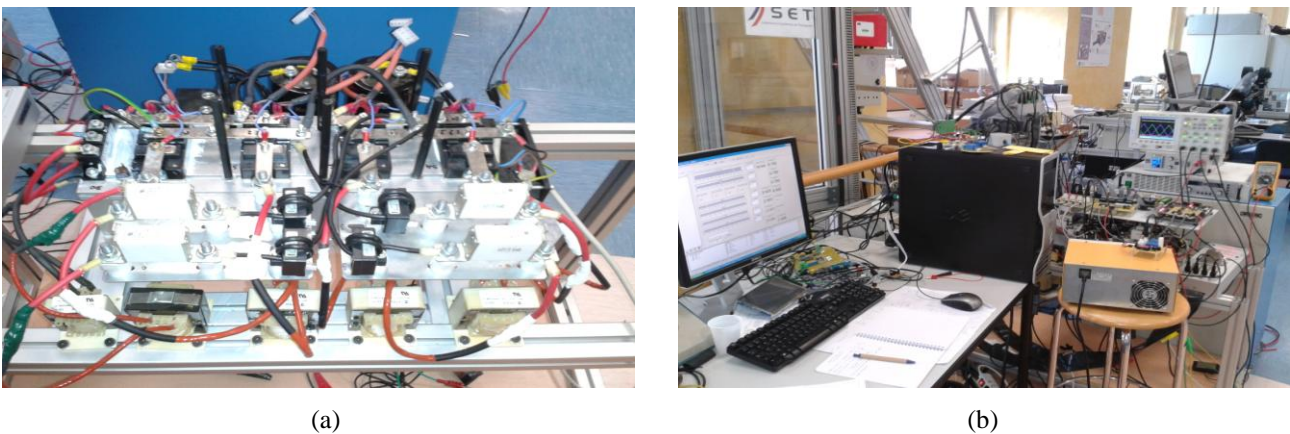


Figure 5 : (a) convertisseur DC/DC boost entrelacé 3 phases, (b) banc de test expérimental

Tableau 1. Caractéristiques du système

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale de la PàC, $P_{FC}$	1 kW
Courant nominal de la PàC, $I_{FCn}$	42 A
Ondulation de courant en mode sain, $\Delta i_{FCn}$	3.3 A
Tension nominale de la PàC, $V_{FC}$	26 V
Tension du bus DC, $V_{DC}$	51 V
Fréquence de commutation, $F_S$	20 kHz
Plage du rapport cyclique, D	0.29-0.49

### 4.2 Impact des défauts sur le dimensionnement des inductances

Des essais expérimentaux sur la maquette expérimentale ont permis de mettre en lumière les conséquences des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des inductances mais aussi sur la pile à combustible. Afin de montrer l'impact d'un fonctionnement en mode dégradé sur la pile à combustible, une étude est portée sur le rapport entre l'ondulation du courant d'entrée du convertisseur,  $\Delta i_{fc}$ , et l'ondulation de courant d'une phase du convertisseur,  $\Delta i_{Lx}$ . Où x représente le numéro de phase. En fonctionnement sain, ce rapport est donné par les relations suivantes :

$$\frac{\Delta i_{fc}}{\Delta i_{Lx}} = \begin{cases} \frac{(1-3D)}{(1-D)} & 0 \leq D \leq \frac{1}{3} \\ \frac{(3D-1)(2-3D)}{3D(1-D)} & \frac{1}{3} \leq D \leq \frac{2}{3} \\ \frac{(3D-2)}{D} & \frac{2}{3} \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

Ces rapports ont été obtenus en se basant sur une étude analytique des courants de phase et de l'équation suivante :

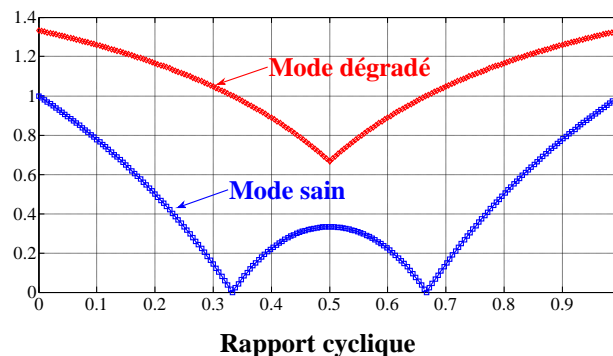
$$\frac{di_{fc}}{dt} = \frac{di_{L1}}{dt} + \frac{di_{L2}}{dt} + \frac{di_3}{dt} \quad (13)$$

De la même manière, il est possible de déterminer les rapports pour un fonctionnement en mode dégradé. Ces rapports sont donnés par les expressions suivantes :

$$\frac{\Delta i_{fc}}{\Delta i_{Lx}} = \begin{cases} \frac{2(\frac{2}{3}-D)}{(1-D)} & 0 \leq D \leq \frac{1}{2} \\ \frac{2(D-\frac{1}{3})}{D} & \frac{1}{2} \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

En utilisant (12) et (14), on peut tracer le rapport entre l'ondulation du courant d'entrée du convertisseur,  $\Delta i_{fc}$ , et l'ondulation de courant d'une phase du convertisseur,  $\Delta i_{Lx}$  pour un mode sain et dégradé en fonction du rapport cyclique. En partant de la Fig. 6, un fonctionnement en mode dégradé va entraîner l'augmentation de l'ondulation de courant de la PàC,  $\Delta i_{fc}$  et par conséquent du rapport tracé sur la Figure 5. L'augmentation de l'ondulation de courant de la PàC peut avoir des effets néfastes sur cette dernière comme cela a été observé dans la littérature [15]-[20]. L'ondulation de courant affecte la capacité de puissance en sortie, la consommation en hydrogène et peut réduire la durée de vie de la pile à combustible. Il a été suggéré dans la littérature [20] de limiter l'ondulation de courant à moins de 10% du courant nominal de la PàC. Dans notre étude, l'ondulation de courant est fixée à 7.5% du courant nominal de la PàC. Cette ondulation est obtenue en dimensionnant les trois inductances (Fig. 3) du convertisseur. Comme le dimensionnement des inductances est étroitement lié à l'ondulation de courant de la PàC, cette dernière est prise en considération dans notre étude pour un dimensionnement optimal des inductances. Comme il peut être observé sur la Fig. 7, l'ondulation de courant atteint dans le cas le plus critique, une valeur de 21% pour un fonctionnement en mode dégradé. De là, la consommation en hydrogène et la capacité de puissance de sortie sont fortement affectées par cette valeur d'ondulation de courant. Cette valeur peut s'expliquer par le fait que les signaux de commande MLI ont gardé le même décalage temporel.

$\Delta i_{fc} / \Delta i_{Lx}$



**Figure 6 : Evolution du rapport entre l'ondulation du courant d'entrée du convertisseur et l'ondulation de courant d'une phase en fonction du rapport cyclique**

Or, ce décalage est inadapté pour réaliser l'entrelacement pour un convertisseur à deux phases, causant l'augmentation de l'ondulation de courant. C'est pourquoi, une fois la phase défectueuse détectée, une stratégie tolérante aux défauts doit être appliquée au convertisseur afin d'adapter le décalage temporel des signaux de commande. L'effet de la stratégie tolérante aux défauts sur l'ondulation de courant est démontré sur la Figure 7. Bien que l'ondulation de courant

soit réduite en appliquant la stratégie, elle reste cependant au-delà du seuil de 10% du courant nominal de la PàC. Par la suite, afin d'illustrer l'impact sur le dimensionnement des inductances, le courant max circulant dans une inductance a été tracé pour un mode sain et dégradé sur la Figure. 8.

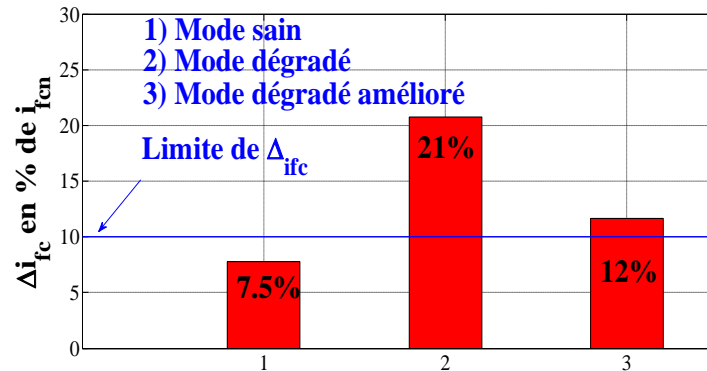


Figure 7 : Diagramme à barre de l'effet d'un fonctionnement en mode dégradé sur l'ondulation de courant

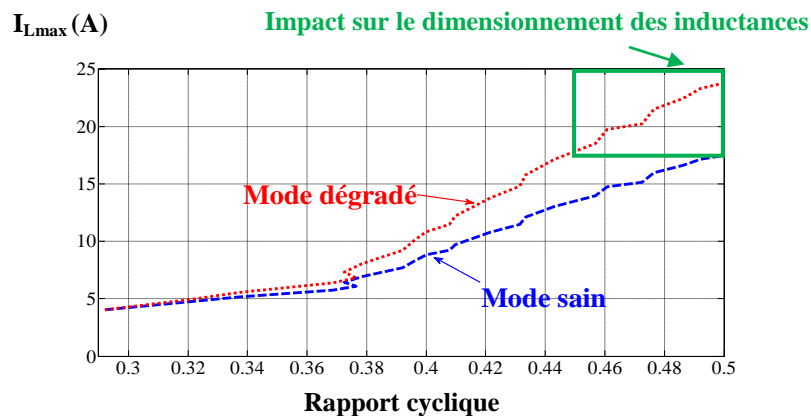


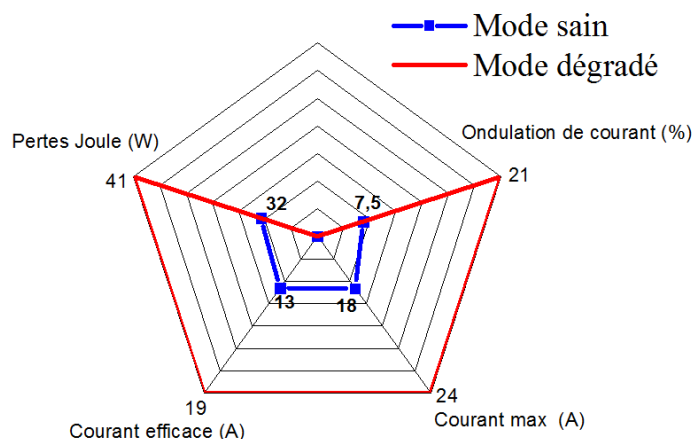
Figure 8 : Effet d'un mode dégradé sur le dimensionnement d'une inductance.

Les inductances sont généralement dimensionnées pour un fonctionnement sain à partir d'un cahier des charges donné. Comme il est mis en valeur sur la Figure 8, les inductances sont soumises à plus de stress en fonctionnement dégradé, en particulier dû au dépassement du courant max que peut supporter l'inductance. En sortant des conditions de fonctionnement définies lors du dimensionnement des inductances, cela peut conduire à la saturation du circuit magnétique. En dépassant l'induction de saturation, la valeur de l'inductance chute, qui peut avoir des impacts sur le contrôle du convertisseur.

La prochaine partie permet de synthétiser dans un radar diagramme l'effet des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des inductances.

## 5. Comparaison du dimensionnement des inductances pour un mode sain et dégradé

Dans notre cas d'étude, une inductance de phase d'une valeur de 65μH est nécessaire afin de satisfaire les exigences de conception de ce convertisseur DC/DC. Une fois la valeur de L connue, la prochaine étape consiste à choisir le noyau magnétique et les conducteurs. Les catalogues des fabricants Elektrisola [21] (pour le choix du type de fil et de la section) et de Ferroxcube [22] (pour le choix du circuit magnétique) ont été utilisés pour permettre la conception de l'inductance. Partant du cahier des charges, un noyau magnétique de type E42/21/15 de la société Ferroxcube a été choisi avec un volume égal à 34.6cm<sup>3</sup>. Le fil de conducteur choisi est du fil de Litz avec une section de 2.82mm<sup>2</sup>. Le diagramme radar représenté sur la Figure. 9 permet de synthétiser l'effet des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des inductances.



**Figure 9 : Synthèse de l'impact des modes dégradés sur le dimensionnement des inductances**

Pour un fonctionnement en mode dégradé, l'inductance de phase doit supporter un courant beaucoup plus élevé, qui représente 33% de courant supplémentaire par rapport à un fonctionnement sain. En outre, en raison de l'augmentation du courant efficace dans une inductance de phase, les pertes Joule augmentent de 28% comparées à un fonctionnement sain. Le radar diagramme souligne que pour un point de fonctionnement nominal en mode dégradé, les inductances sont soumises à plus de stress en termes de pertes et d'échauffement. De plus, il est clairement visible dans la Figure 8 que pour une certaine gamme de fonctionnement, les inductances sortent de leurs conditions d'utilisation définies lors du dimensionnement des inductances. De là, un fonctionnement dans cette intervalle pourrait conduire à la saturation du circuit magnétique et par conséquent la perte du contrôle du convertisseur. C'est pourquoi une stratégie tolérante aux défauts doit être appliquée au convertisseur après le diagnostic de la phase défectueuse. Cette stratégie consiste à dégrader les performances du véhicule afin de le ramener dans une gamme de fonctionnement appropriée pour éviter dans un premier temps la dégradation du fonctionnement du convertisseur et également un surdimensionnement des inductances qui pourrait conduire à l'ajout de volume et de masse et une réduction de l'efficacité énergétique.

## 6. Conclusion

L'objectif de cet article est de mettre en lumière dans un premier temps les effets des fonctionnements en mode dégradé sur la pile à combustible et également sur le dimensionnement des inductances. Ce type de fonctionnement a des effets négatifs sur la pile à combustible en particulier sur sa consommation en hydrogène ainsi que sa durée de vie. Par comparaison, les inductances de phase sont soumises à plus de stress, qui peut conduire à la saturation du circuit magnétique et par conséquent la perte du contrôle du convertisseur en raison de la chute de la valeur de l'inductance  $L$ . Toutefois, ces stress dépendent fortement de la gamme de fonctionnement dans laquelle le convertisseur travaille. Partant de cette analyse, une synthèse a été réalisée pour résumer l'effet des fonctionnements en mode dégradé sur le dimensionnement des inductances. La synthèse a montré que les inductances de phase doivent supporter un courant 33% plus élevé comparé à un fonctionnement sain. De là, le courant efficace augmente, provoquant l'augmentation de 28% des pertes Joule par rapport à un fonctionnement sain. Partant de ces observations, des solutions doivent être envisagées comme par exemple une stratégie tolérante aux défauts. Cette stratégie doit être appliquée une fois que la phase défectueuse a été détectée. Cette stratégie consiste à dégrader les performances du véhicule afin de le ramener dans une gamme de fonctionnement appropriée. Cette stratégie tolérante aux défauts a deux objectifs principaux : la première est d'éviter la saturation du circuit magnétique pouvant conduire à la perte du contrôle du convertisseur et également de faire en sorte de ne pas recourir au surdimensionnement des inductances pouvant conduire à l'ajout de volume et de masse qui n'est pas approprié pour des applications automobiles.

## Références

- [1] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, A. Djerdir, "Energy Efficiency and Fault Tolerance Comparison of DC/DC Converters Topologies for Fuel Cell Electric Vehicles", *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC 2013)*, Dearborn, USA, 2013, pp. 1-7.
- [2] B. Liu, S.K. Sharma, "Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 45, Iss. 5, 2009, pp. 1770-1777.
- [3] S. Karimi, A. Gaillard, P. Poure, S. Saadate, "FPGA-based Real-Time Power Converter Failure Diagnosis for Wind Energy Conversion Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, Iss. 12, December 2008, pp. 4299-4308.
- [4] IEEE Xplore, Mars 2014, disponible en ligne: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

- [5] M. Kabalo, B. Blunier, D. Bouquain, et A. Miraoui, « Comparison analysis of high voltage ratio low input current ripple floating interleaving boost converters for fuel cell applications », in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011, p. 1-6.
- [6] M. Harinee, V.S. Nagarajan, Dimple, R. Seyezhai, B.L. Mathur, “Modeling and design of fuel cell based two phase interleaved boost converter”, In *1st International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2011, pp. 72-77.
- [7] H. Xu, X. Wen, E. Qiao, X. Guo, L. Kong, “High Power Interleaved Boost Converter in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle”, in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, pp. 1814-1819.
- [8] D. Guilbert, A. Mohammadi, A. Gaillard, A. N’diaye, A. Djerdir, “Interactions between Fuel Cell and DC/DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle Applications: Influence of Faults”, *39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013*, 2013, pp. 1-6.
- [9] G. Dawei, J. Zhenhua, L. Qingchun, “Performance Comparison of Different Fuel Cell Vehicle Power Trains”, in: *Proc. Of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC’08)*, 2008, pp. 1-5.
- [10] M. Kabalo, B. Blunier, D. Bouquain, A. Miraoui, “State-of-the-Art of DC/DC converters for fuel cell vehicles”, in: *Proc. Of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, (VPPC’10)*, Lille, 2010, pp. 1-6.
- [11] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, A. Djerdir, “Comparaison de topologies de convertisseurs DC/DC entrelacées en cas de défauts d’interrupteurs de puissance pour véhicule électrique à pile à combustible”, *La Revue 3E.I*, papier invité suite à la conférence JCGE 2013, numéro spécial Octobre 2013.
- [12] M. Rylko, B. Lyons, K. Hartnett, J. Hayes, M. Egan, “Magnetic material comparisons for high-current gapped and gapless foil wound inductors in high frequency DC-DC converters”, in *Proc. 13th IEEE EPE-PEMC*, 2008, pp. 1249-1256.
- [13] J. Ferrieux, F. Forest, *Alimentations à Découpage Convertisseurs à Résonance: Principes Composants Modélisation*. Paris, France: Dunod, 1999.
- [14] Colonel Wm, T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., 1988.
- [15] G. Fontes, C. Turpin, S. Astier, T. Meynard, “Interactions between fuel cell and power converters: Influence of current harmonics on a fuel cell stack”, *IEEE Transactions Power Electronics*, Vol.22, Iss. 2, 2007, pp. 670-678.
- [16] B. Wahdame, L. Girardot, D. Hissel, F. Harel, X. François, D. Candusso, M.C. Pera, L. Dumercy, “Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE’08)*, 2008, pp. 1495-1500
- [17] J.H. Kim, M.H. Jang, J.S. Choe, D.Y. Kim, Y.S. Tak, and B.H. Cho, “An Experimental analysis of the Ripple Current Applied Variable Frequency Characteristic in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell”, *Journal of Power Electronics*, Vol.11, No.1, January 2011, pp. 82-89.
- [18] L. Palma, M. Harfman Todorovic, P. Enjeti, “Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06. Twenty-First Annual IEEE*, pp. (10), 2006.
- [19] M. Gerard, J.P. Poirot-Crouzevier, D. Hissel, M.C. Pera, “Ripple Current Effects on PEMFC Aging Test by Experimental and Modeling”, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 8, April 2011, pp. 1-5.
- [20] J.S. Lai, C. Liu, A. Ridenour, “Multiphase soft switched dc/dc converter and active control technique for fuel cell ripple current elimination”, April 14 2009, US Patent 7,518,886.
- [21] [www.elecktrisola.com](http://www.elecktrisola.com)
- [22] [www.ferroxcube.com](http://www.ferroxcube.com)