

# Comparaison de topologies de convertisseurs DC/DC entrelacées en cas de défauts d'interrupteurs de puissance pour 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 pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) a été désignée par les chercheurs publics et privés comme étant le candidat idéal pour les applications automobiles à grande autonomie et à zéro émission de polluants (gaz, bruits). Cependant, avant la commercialisation des véhicules électriques à pile à combustible, certains verrous technologiques restent à résoudre en particulier la continuité de service de la chaîne de traction du véhicule en cas de défauts. Dans cette optique, ce travail de recherche se focalise sur les convertisseurs DC/DC entrelacés permettant de prendre en compte les problématiques des applications automobiles à pile à combustible. Ces topologies ont la possibilité comparée à la topologie boost classique de fonctionner même en cas de défauts, permettant par conséquent d'assurer une continuité de service. L'objectif de cet article est de montrer et analyser les impacts de défauts d'interrupteurs de puissance pour chaque topologie sur l'ondulation de courant de la pile à combustible, les formes d'onde (e.g. tension du bus DC, courants de phase des topologies) et sur les inductances sans modifier les topologies et leurs contrôles.

**ABSTRACT** – In recent years, the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been named by public and private researchers as excellent candidate for automotive applications with a high degree of autonomy and zero pollutant emissions (gases, noise). However, before the commercialization of fuel cell electric vehicles (FCEV), some challenging issues remain to be solved, especially the continuity of service of the power train of vehicle in case of faults. In this perspective, this research work focuses on interleaved DC/DC converters enabling to take into account the requirements of FCEV applications. These topologies have the capacity compared with the classic boost topology to operate even in case of faults, ensuring consequently a continuity of service. The purpose of this paper is to show and analyze the impacts of power semiconductor faults for each topology on fuel cell current ripple, waveforms (e.g. DC bus voltage, phase inductor currents) and inductors without modifying the topologies and controls.

**MOTS-CLES** – Pile à combustible, Véhicules électriques, Convertisseurs DC/DC entrelacés, Tolérance aux fautes.

## 1. Introduction

Depuis ces dernières années, la pile à combustible connaît un intérêt croissant pour la génération de puissance autant pour les applications stationnaires qu'embarquées. Parmi les technologies existantes, la pile à combustible à membrane d'échange de protons bien connue sous le nom de *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, est l'une des technologies les plus prometteuses pour la production d'énergie dans les applications automobiles en raison d'une densité d'énergie élevée et d'une faible température de fonctionnement, lui permettant un démarrage plus rapide [1]. Cependant, certaines questions sont toujours en attente, en particulier sur la faible tension produite en sortie de la pile à combustible. En conséquence, un convertisseur DC/DC est indispensable pour élever cette tension jusqu'au niveau de tension du bus DC. Afin d'être optimaux, les convertisseurs DC/DC doivent répondre à de nombreuses problématiques dans les applications véhicule électrique à pile à combustible telles que [2] :

- 1) Faible masse et petit volume ;
- 2) Haute efficacité énergétique ;
- 3) Haute densité de puissance ;
- 4) Faible coût ;
- 5) Faible perturbation électromagnétique ;
- 6) Ondulation de courant réduite afin de prolonger la durée de vie de la pile à combustible.

En outre, la fiabilité et la continuité de service des chaînes de tractions restent des préoccupations majeures afin que les véhicules électriques puissent accéder au marché grand public de l'automobile. En effet, la présence de défauts dans les chaînes de traction peut conduire à des dysfonctionnements dans les véhicules et ainsi réduire ses performances par

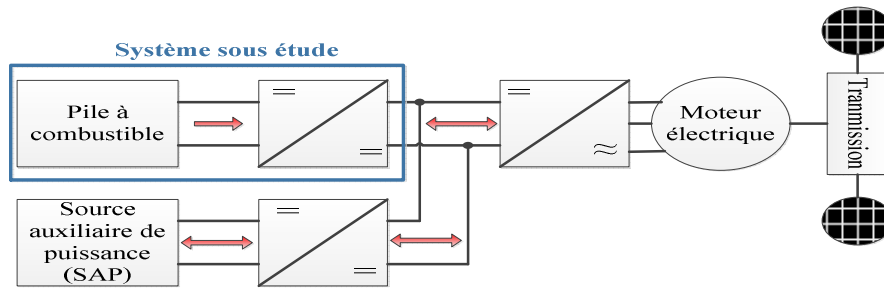


Figure 1 : Architecture de la chaîne de traction d'un véhicule électrique à pile à combustible [3]

rapport aux véhicules conventionnels. Dans l'hypothèse où des défauts électriques se produisaient, les chaînes de traction des véhicules électriques à pile à combustible devraient inclure des topologies et/ou contrôles tolérants aux fautes pour les différents convertisseurs DC/DC et DC/AC. Cependant, des topologies et contrôles tolérants aux fautes pour des convertisseurs DC/AC ont été largement étudiés dans la littérature [4]. C'est pourquoi, le travail de recherche se concentre sur l'étude de deux topologies de convertisseurs DC/DC entrelacées en termes de tolérance aux défauts. Jusqu'à maintenant, ces topologies ont été étudiées dans la littérature [5]-[7] pour des conditions de fonctionnement en mode sain (sans défauts). La contribution principale de cet article est d'analyser les impacts des fonctionnements en mode dégradé (présence de défauts) pendant le fonctionnement du véhicule. Les deux éléments les plus critiques dans les convertisseurs DC/DC sont les condensateurs électrolytiques aluminium et les interrupteurs de puissance. En effet, 60% des dysfonctionnements et pannes sont dues à des défaillances des condensateurs électrolytiques et 31% à des défaillances des interrupteurs de puissance [8]. Plusieurs travaux ont été rapportés dans la littérature concernant l'impact de la dégradation des condensateurs dans les convertisseurs DC/DC [8], [9]. Ainsi, cette étude insiste sur les défauts d'interrupteur de puissance. Le véhicule électrique à pile à combustible représenté sur la Figure 1, utilise une pile à combustible comme source principale de puissance et une source auxiliaire de puissance (batteries ou supercondensateurs) pour assister la propulsion du véhicule pendant les phases transitoires et absorber l'énergie cinétique durant les phases de freinage régénératif. De plus, cette configuration permet d'améliorer la durée de vie de la pile à combustible et l'économie d'hydrogène.

Tout d'abord, les deux convertisseurs DC/DC entrelacés et leurs avantages sont présentés dans la section 2. Ensuite, les modélisations de la pile à combustible et des deux topologies de convertisseurs DC/DC associées à leurs contrôles sont présentées dans la section 3. Enfin, des résultats de simulation pour l'impact des défauts sur la pile à combustible et les deux topologies sont illustrés dans la section 4.

## 2. Topologies de convertisseurs DC/DC entrelacés

### 2.1 Présentation des deux topologies

La première topologie est un convertisseur DC/DC boost entrelacé, bien connue sous le nom de *Interleaved Boost Converter (IBC)*, consistant à relier  $N$  convertisseur boost en parallèle partageant un bus DC commun. Le choix du nombre de phases résulte d'un compromis entre le volume des inductances, rendement, ondulation de courant d'entrée, redondance et coût. En revanche, la seconde topologie est un convertisseur DC/DC boost flottant entrelacé, communément appelé *Floating-Interleaving Boost Converter (FIBC)* [6]. Cette dernière présente certains avantages, par exemple l'entrelacement et un gain de tension élevé. Afin de respecter l'équilibre du bus flottant, le nombre d'entrelacement du convertisseur FIBC doit être toujours paire. Le choix du nombre de phases de ce convertisseur résulte d'un compromis entre l'ondulation de courant d'entrée, le volume des inductances et l'efficacité énergétique [7]. Les schémas électriques des deux topologies entrelacées associées à la pile à combustible sont représentés sur la Fig. 2.

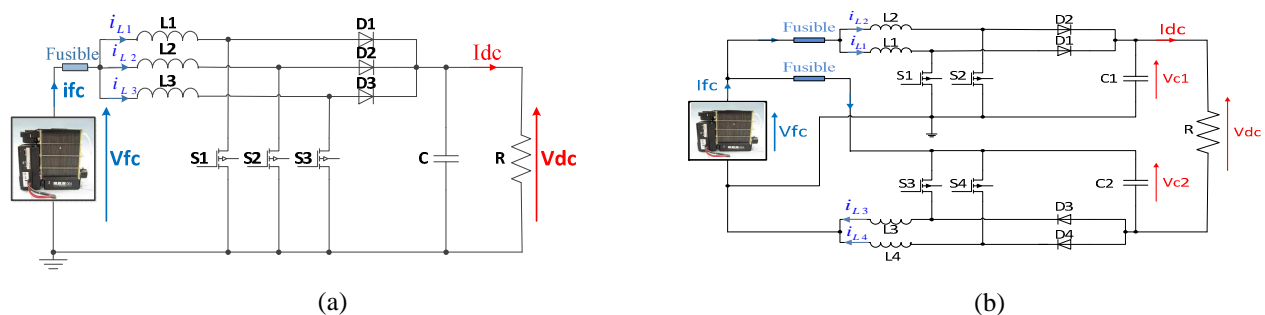


Figure 2 : (a) Convertisseur boost entrelacé 3 phases (IBC), (b) Convertisseur boost flottant entrelacé 4 phases (FIBC)

Afin de faciliter l'étude, le reste de la chaîne de traction est considérée comme une charge résistive connectée au bus DC. De plus, des fusibles ont été ajoutés à la Figure 2 afin d'isoler la pile à combustible en cas de défauts de court-circuit. Ces fusibles sont placés en série avec la pile à combustible dans le cas de topologies non-tolérantes aux fautes. Par contre, si les topologies proposées étaient tolérantes aux fautes, les fusibles seraient en série avec les interrupteurs de puissance, permettant par conséquent de satisfaire les exigences de la tolérance aux fautes.

## 2.2 Avantages de ces topologies

Les convertisseurs DC/DC entrelacés ont plusieurs avantages comparés aux autres topologies de convertisseurs DC/DC pour des applications pile à combustible [10]-[14], incluant la compacité, haut rendement, fiabilité, courant d'ondulation réduit et l'adaptation aux fonctionnements en mode dégradé. Par ailleurs, ces topologies peuvent être tolérantes aux fautes en cas de défauts. En effet, en raison de leurs architectures redondantes, si un défaut apparaît sur une phase, les autres phases peuvent être utilisées comme un système de compensation, évitant par conséquent une interruption de fourniture d'énergie. Une autre raison pour ce choix de topologies est l'annulation du courant d'ondulation pour des valeurs spécifiques de rapport cyclique. Par exemple, pour la topologie (a), l'ondulation de courant devient nulle pour deux valeurs de rapport cyclique ; tandis que pour la topologie (b), elle devient nulle pour trois valeurs de rapport cyclique. La Figure 2 montre la variation du rapport de l'ondulation du courant d'entrée,  $\Delta i_{fc}$  sur l'ondulation de courant dans une inductance,  $\Delta i_{Lx}$  en fonction du rapport cyclique pour la topologie boost classique utilisée en générale pour des applications pile à combustible [15], IBC N=3 et FIBC N=4. Où  $x \in \{1, \dots, N\}$ , N est le nombre de phases du convertisseur.

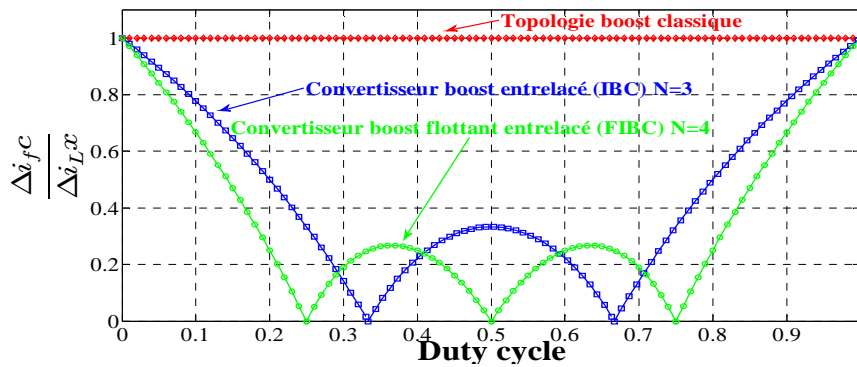


Figure 3 : Rapport de l'ondulation de courant d'entrée sur l'ondulation de courant dans une inductance en fonction du rapport cyclique

## 3. Modélisation du système étudié et contrôles des deux topologies

### 3.1 Modélisation et validation du modèle de la pile à combustible

#### 3.1.1 Modélisation multi-physique

Afin de décrire avec précision le comportement de la pile à combustible, une modélisation multi physique de la pile à combustible a été utilisée. Cette modélisation couvre le domaine électrique et thermique. La Figure 4 montre la modélisation multi physique de la pile à combustible sous forme de bloc avec les données d'entrées et de sortie.



Figure 4 : Modélisation multi physique de la pile à combustible

Le domaine électrique permet de décrire la courbe de polarisation et les pertes associées. Ces dernières peuvent être classifiées en trois catégories : pertes d'activation, pertes ohmiques et pertes par concentration. En tenant compte de ses pertes, la tension  $V_{fc}$  délivrée par la pile à combustible peut être exprimée par [16], [17]:

$$V_{fc} = E - \Sigma \text{pertes} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc} \quad (1)$$

Où E représente la tension idéale de la pile à combustible. Les performances de la pile à combustible dépendent fortement des conditions de fonctionnement comme par exemple la pression, la température et l'humidité relative. C'est

pourquoi, ces paramètres sont intégrés dans la modélisation. Par comparaison, le domaine thermique décrit la génération de chaleur, les échanges de chaleur par convection dans les canaux, les diffusions de chaleur par conduction ou par transport de masse, la radiation et la convection naturelle [16]. Le domaine thermique peut être modélisé par l'équation suivante [16] :

$$m_{stack} C_{p,stack} \left( \frac{dT_{stack}}{dt} \right) = Q_{theo} - Q_{elec} - Q_{conv} - Q_{pertes} \quad (2)$$

Où  $m_{stack}$  est la masse du stack,  $C_{p,stack}$  est la capacité thermique à pression constante,  $Q_{theo}$  est la puissance totale théorique dynamique produite pendant la réaction électrochimique,  $Q_{elec}$  est la puissance électrique,  $Q_{conv}$  est le flux thermique par convection dans les canaux et enfin  $Q_{pertes}$  est le flux thermique dissipé par la surface externe du stack.

### 3.1.2 Validation du modèle

Des essais expérimentaux ont été réalisés afin de les comparer à la modélisation multi-physique. Le banc de test de la pile à combustible est montré sur la Figure 5. La Figure 6 compare les mesures expérimentales à la fois pour le modèle électrique et thermique. Comme il peut être observé, la modélisation multi-physique permet de donner une excellente approximation des mesures expérimentales.

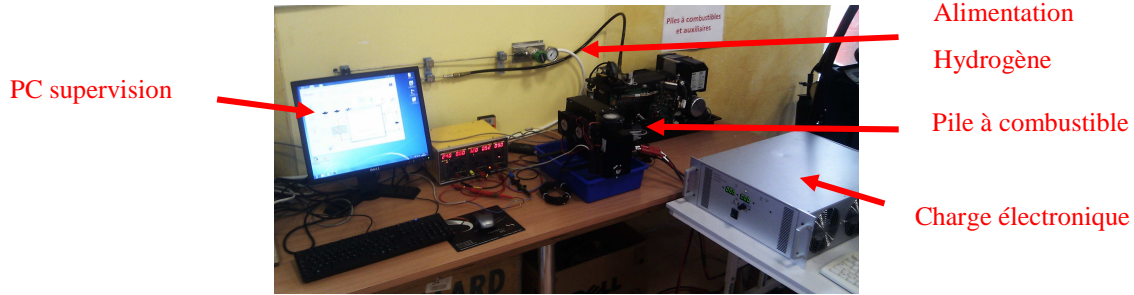


Figure 5 : Banc de test des essais expérimentaux sur la pile à combustible

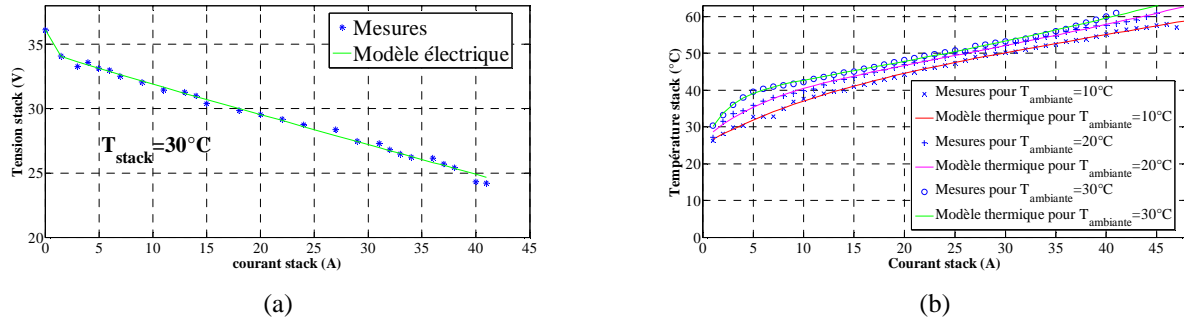


Figure 6 : (a) Validation du modèle électrique, (b) Validation du modèle thermique

## 3.2 Modélisation des topologies IBC et FIBC

### 3.2.1 Modélisation dynamique

Afin de concevoir les contrôles pour des objectifs de performance, des modèles dynamiques appropriés des topologies sont exigés. Par conséquent, la modélisation moyenne en petits signaux, bien connue sous le nom *small-signal averaged model* [18], a été appliquée pour chaque topologie afin de prendre en considération leurs non-linéarités dues aux interrupteurs de puissance, inductances, etc... Ce modèle moyen en petits signaux a été évalué en écrivant les équations des deux topologies reportées sur la Figure 2 dans les périodes de fonctionnement D.Ts et (1-D).Ts. Où Ts est la période de commutation des deux topologies et D est le rapport cyclique. En outre, dans cette étude, les résistances internes des inductances,  $R_{Lx}$  sont négligées. Tout d'abord, les fonctions de transferts en boucle ouverte dans le domaine de Laplace du convertisseur IBC ont été obtenues à partir du modèle moyen en petits signaux :

$$G_{ix}(s) = \frac{\widetilde{i_{Lx}}}{\widetilde{d}} = \frac{2V_{dc}}{R(1-D)^2} \frac{1 + \frac{RC}{2}s}{1 + (\frac{L}{R(1-D)^2})s + (\frac{LC}{(1-D)^2})s^2} ; G_{vx}(s) = \frac{\widetilde{v_{dc}}}{\widetilde{i_{Lx}}} = \frac{R(1-D)}{2} \frac{1 - (\frac{L}{R(1-D)^2})s}{1 + (\frac{RC}{2})s} \quad (3)$$

De la même façon, les fonctions de transfert en boucle ouverte dans le domaine de Laplace du convertisseur FIBC ont été obtenues :

$$G_{ix}(s) = \frac{\widetilde{i_{Lx}}}{\widetilde{d}} = \frac{2(D+3)(1+\frac{RC}{D+3})s}{2R(1-D)^2 + 2Ls + RLCs^2} ; G_{vx}(s) = \frac{\widetilde{v_{dc}}}{\widetilde{i_{Lx}}} = \frac{2R(1-D)V_{dc} - \frac{2RLs}{1+D}}{2R(1-D)^2 + 2Ls + RLCs^2} \quad (4)$$

Où  $\widetilde{v_{dc}}$ ,  $\widetilde{d}$ ,  $\widetilde{i_L}$  sont des petites perturbations autour de leurs points de fonctionnements.

### 3.2.2 Choix du contrôle des deux topologies

La conception optimale d'un correcteur est une tâche difficile étant donné que, selon les équations (3) et (4), les paramètres des fonctions de transfert varient fortement avec la charge R. Afin de choisir et de concevoir correctement les correcteurs, il est essentiel d'établir les objectifs de contrôle, qui peuvent être formulés comme suit :

- 1) La tension du bus DC doit être régulée à chaque instant lors des variations de charge et des conditions de fonctionnements de la pile à combustible influant la tension délivrée ;
- 2) Le courant de la pile à combustible doit être réparti équitablement entre les différentes phases des convertisseurs afin d'éviter une surcharge sur l'une des phases, particulièrement pour des valeurs de charge élevées. En outre, les courants de phase doivent être correctement décalés les uns par rapports aux autres afin de minimiser l'ondulation de courant d'entrée qui est indésirable dans les applications pile à combustible ;
- 3) La stabilité et les performances dynamiques doivent être toujours garanties quand le système fonctionne en boucle fermée.

Par ailleurs, ces objectifs de contrôle doivent être respectés pour des conditions de fonctionnement en mode dégradé. En d'autres termes, la régulation de la tension du bus DC et la répartition équitable du courant dans chaque phase doivent être assurés en présence de défauts. Dans cette optique, un contrôle PI intégrant deux boucles de régulation semble le plus approprié afin de satisfaire les exigences de contrôle. Le diagramme bloc du contrôle linéaire en boucle fermée pour une phase est montré sur la Figure 7.

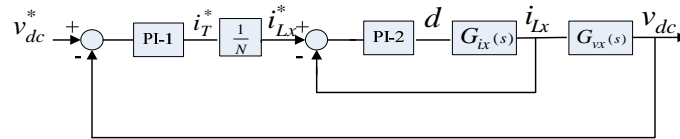


Figure 7 : Diagramme bloc du contrôle linéaire en boucle fermée pour une phase

### 3.2.3 Présentation et conception du contrôle des deux topologies

L'architecture de la stratégie de contrôle linéaire des deux topologies est représentée sur la Figure 8.

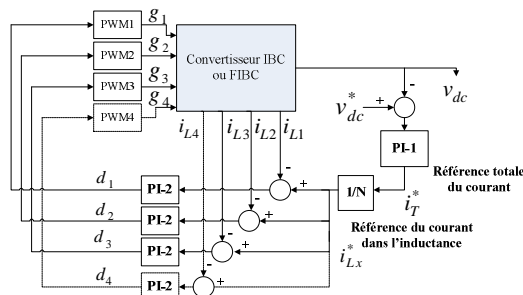


Figure 8 : Architecture de la stratégie de contrôle linéaire

Cette dernière se compose d'une boucle de tension qui compare la référence de la tension du bus DC avec celle mesurée. De là, la référence totale du courant est obtenue à partir d'un contrôle PI et ensuite cette référence est partagée équitablement entre les différentes phases. Par exemple, pour la topologie IBC, la référence totale du courant est divisée par N=3 ; tandis que pour la topologie FIBC, le courant total est divisé par N=4. Ensuite, la boucle interne permet d'obtenir les rapports cycliques {d1, d2, d3, d4} à partir des contrôles PI. Enfin, les rapports cycliques sont comparées à des signaux PWM à la fréquence de commutation Fs et ensuite les signaux sont décalés les uns par rapport aux autres afin de constituer les signaux de commande des interrupteurs de puissance {g1, g2, g3, g4}. Par exemple, ces

signaux de commande sont décalés de  $T_s/3$  et  $2T_s/3$  pour la topologie IBC ; tandis que les signaux sont décalés de  $T_s/4$ ,  $T_s/2$  et  $3T_s/4$  pour la topologie FIBC. Les contrôles PI {PI-1, PI-2} sont définis par les expressions suivantes :

$$PI-1(s) = K_1(1 + \frac{1}{T_1 s}) ; PI-2(s) = K_2(1 + \frac{1}{T_2 s}) \quad (5)$$

Ces contrôles PI ont été conçus afin de satisfaire les objectifs de contrôle et certaines exigences de conception telles que la marge de phase, la marge de gain et le temps de réponse. En résumé, ils conduisent aux performances satisfaisantes, à savoir une marge de phase à  $45^\circ$  et une marge de gain à 10dB.

## 4. Résultats de simulation

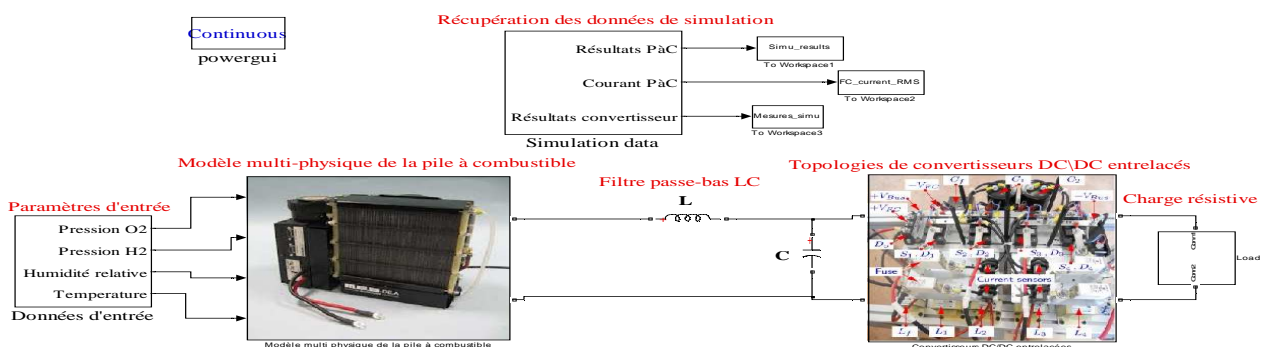
### 4.1 Etude des topologies en mode sain

En s'appuyant sur le modèle multi physique de la pile à combustible, des topologies de convertisseurs DC/DC et de la conception des contrôles PI, des simulations numériques ont été réalisées. Le logiciel Matlab®-Simulink® a été adopté comme outil de simulation, avec les paramètres du système étudié donnés dans le Tableau 1.

**Tableau 1. Paramètres du système étudié + PI**

Paramètre du système	Valeur
Puissance nominale de la pile à combustible, $P_{fc}$	1 [kW]
Plage de tension de la pile à combustible, $V_{fc}$	24-36 [V]
Tension nominale de la pile à combustible, $V_{fc}$	26 [V]
Courant nominal de la pile à combustible, $I_{fc}$	42 [A]
Tension du bus DC, $V_{dc}$	100 [V]
Fréquence de commutation, $F_s$	10 [kHz]
<b>Paramètres PI du convertisseur IBC</b>	
PI-1 (boucle de tension)	K1=300 T1=1
PI-2 (boucle de courant)	K2=5.5 T2=0.002
<b>Paramètres PI du convertisseur FIBC</b>	
PI-1 (boucle de tension)	K1=80 T1=0.8
PI-2 (boucle de courant)	K2=5 T2=0.003

Plusieurs travaux ont été reportés dans la littérature concernant l'étude des convertisseurs DC/DC pour des applications pile à combustible. La plupart de ces études considère soit que la pile à combustible fonctionne à sa tension nominale [7] ou bien à des points spécifiques selon certaines valeurs de rapport cyclique [5], [6], [19]-[21]. Par conséquent, le rapport cyclique reste inchangé en dépit des variations de la charge. Un des objectifs de cet article est de considérer la non-linéarité de la courbe de polarisation afin de prendre en considération différents points de fonctionnements avec des rapports cycliques variables. Par ailleurs, le but de cette partie est de montrer quelque résultat de simulation lorsque les deux topologies fonctionnent en mode sain, c'est-à-dire sans défauts. La modélisation du système sous Matlab®-Simulink® est représentée sur la Figure 9. Un filtre passe-bas LC a été placé entre la pile à combustible et le convertisseur DC/DC afin de filtrer l'ondulation de courant HF généré à l'entrée du convertisseur.



**Figure 9 : Modélisation du système dans l'environnement Matlab/Simulink**



Les résultats de simulations sont donnés sur les figures 10 et 11.

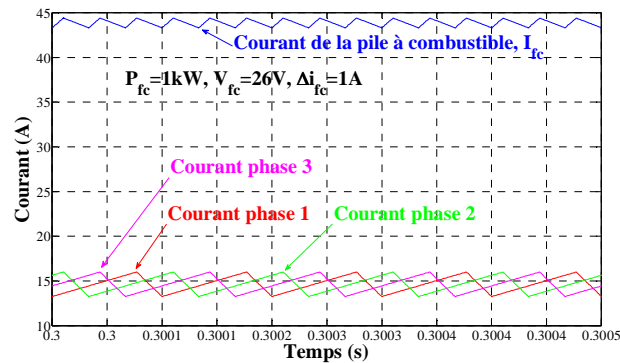


Figure 10 : Courants de la pile à combustible et des inductances pour la topologie IBC

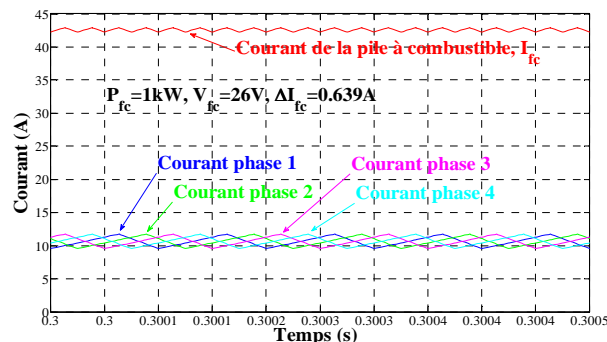


Figure 11 : Courants de la pile à combustible et des inductances pour la topologie FIBC

Les Figures 10 et 11 illustrent les courants de la pile à combustible et des inductances. Comme il peut être vu sur les Figures 10 et 11, pour un fonctionnement en régime établi à puissance nominale, l'ondulation du courant FIBC est plus faible que celle de la topologie IBC en raison de son nombre d'entrelacement. Partant de ces résultats en fonctionnement sain, l'objectif par la suite est d'illustrer les impacts de défauts d'interrupteurs de puissance sur ces grandeurs physiques tant sur la pile à combustible que sur le convertisseur.

## 4.2 Etude des topologies en mode dégradé

### 4.2.1 Défauts considérés dans les convertisseurs DC/DC

En se basant sur la distribution de défaillance pour chaque composant des convertisseurs DC/DC [8] et la littérature concernant l'étude des défauts [8], [9], cet article se concentre principalement sur l'étude des impacts de défauts d'interrupteurs de puissance. Les défauts les plus communs dans les interrupteurs de puissance sont les défauts de circuit-ouvert, défauts de commande et enfin défauts de court-circuit [22]. Les défaillances dans ce composant peuvent être attribuées à différents facteurs, tels que :

- 1) Défaillance de la commande ;
- 2) Conditions de fonctionnement avec des courants et tensions élevés ;
- 3) Transitoires.

En outre, les défauts de circuit-ouvert peuvent être une conséquence directe des défauts de court-circuit ou de commande. Dans cette étude, seulement les défauts de circuit-ouvert sont considérés. De plus, une discussion est ouverte sur les impacts des défauts de court-circuit sur le fonctionnement des topologies.

### 4.2.2 Impacts des défauts de circuit-ouvert

Afin d'étudier les impacts, un défaut de circuit ouvert a été simulé à  $t=0.5s$  lorsque la pile à combustible fonctionne en régime permanent à sa puissance nominale. Ce défaut est simulé en créant une défaillance dans la commande du convertisseur. La Figure 12 illustre l'architecture de la stratégie de commande avec la simulation d'un défaut circuit-ouvert sur l'interrupteur S2.

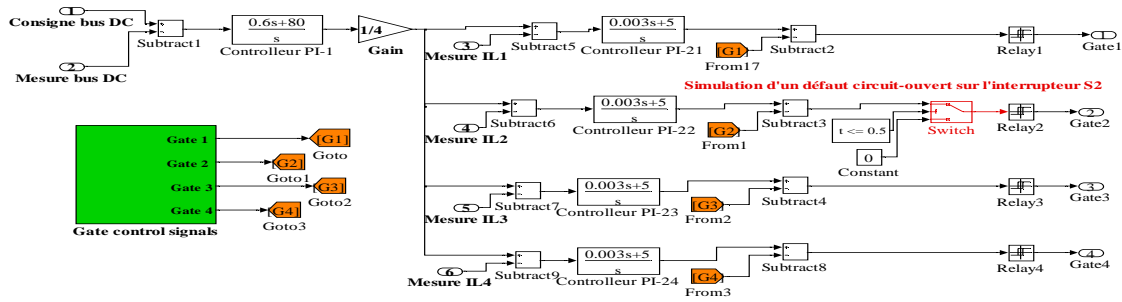


Figure 12 : Simulation d'un défaut dans la commande pour la topologie FIBC

Dans un premier temps, les effets sur les courants et la tension du bus DC sont illustrés sur les Figures 13 et 14.

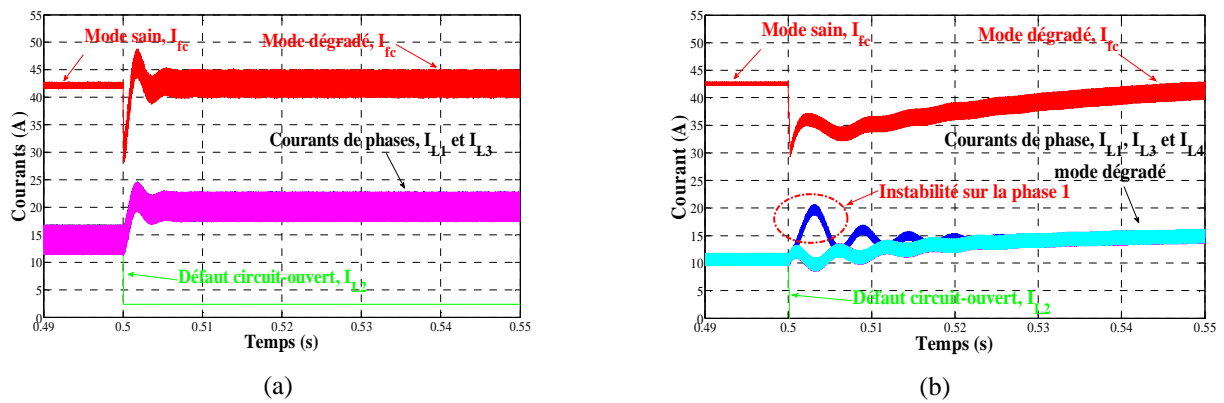


Figure 13 : Courants de la pile à combustible et des inductances avant et après défaut : (a) Topologie IBC, (b) Topologie FIBC

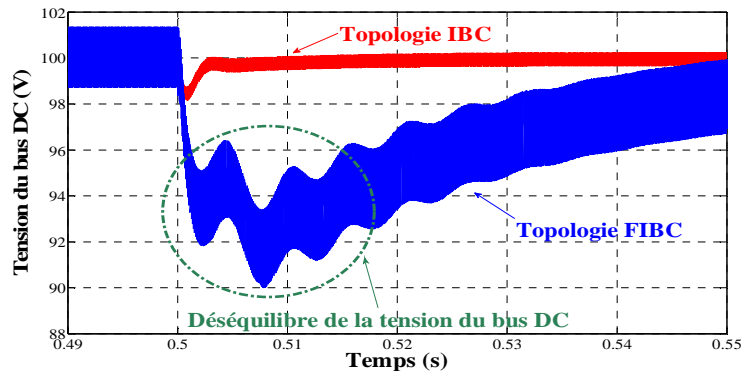


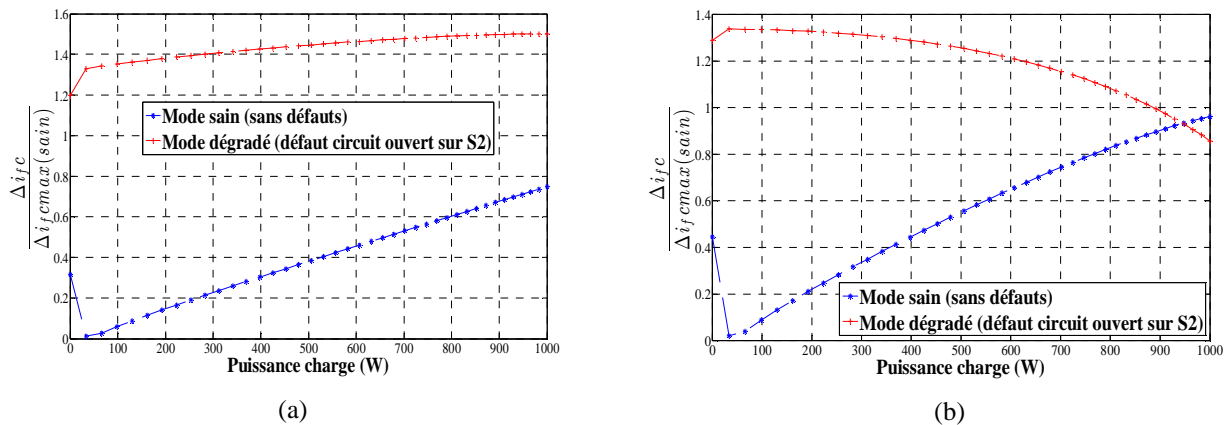
Figure 14 : Tension du bus DC avant et après défaut pour les deux topologies

Comme il peut être observé sur les Figures 13 et 14, si une phase du convertisseur est hors-service, les topologies entrelacées continuent à fournir de la puissance à la charge sans interruption. Cependant, contrairement à la topologie IBC, la topologie FIBC est réalisée par la connexion en parallèle des versions flottantes et non-flottantes du boost classique [6]. En conséquence, dans le cas de cette étude, le défaut a été créé dans la partie flottante causant une instabilité sur la phase 1 de la topologie comme le souligne les Figures 13b et 14. Malgré la présence du défaut, la perte d'une phase est compensée sur les trois phases avec une répartition équitable du courant. En outre, l'absence d'une phase dans le fonctionnement des topologies va entraîner l'augmentation de l'ondulation de courant de la pile à combustible. Cette augmentation peut avoir des effets négatifs sur la pile à combustible, tels que [23], [24] :

- 1) Réduction de sa durée de vie qui peut conduire à un remplacement prématuré de cette dernière ;
- 2) Pertes additionnelles internes produites par la fréquence de l'ondulation de courant dégradant le rendement ;
- 3) Surconsommation d'hydrogène conduisant à une pénalité de coût.



De la même façon, l'augmentation du courant dans chaque phase a des impacts sur les éléments magnétiques comme par exemple la saturation magnétique [17]. En fait, les inductances ont été dimensionnées en accord avec le cahier des charges et également avec les problématiques actuelles dans les applications automobiles. En conséquence, en présence d'un défaut, les inductances de phase subissent un stress additionnel en raison de l'élévation interne de la température et la saturation magnétique. Afin de prévenir ces défauts, les éléments du convertisseur (inductances, interrupteurs de puissance) devraient être surdimensionnés comparés au cahier des charges initiale. Toutefois, ce surdimensionnement conduit à l'ajout de volume et de masse mais également à une diminution du rendement, ce qui n'est pas concevable dans des applications automobiles. Afin d'illustrer les effets sur le dimensionnement des inductances, la variation du rapport de l'ondulation de courant de la pile à combustible sur l'ondulation de courant maximale en mode sain en fonction de la puissance de charge est illustrée sur la Figure 15.



**Figure 15 : Effets sur l'ondulation de courant et le dimensionnement des inductances : (a) Topologie IBC, (b) Topologie FIBC**

En se basant sur la Figure 15, lorsqu'un défaut de circuit ouvert se produit, le rapport augmente comparé au rapport en mode sain. En effet, le rapport est supérieur à 1 pour toute la plage de puissance de charge pour la topologie IBC ; tandis que pour la topologie FIBC, le rapport est supérieur à 1 jusqu'à une puissance de 900W. Par conséquent, précisément dans cette gamme de puissance, les inductances sont soumises à des stress additionnels. Parallèlement, l'augmentation des courants des inductances cause des pertes additionnelles dans les interrupteurs de puissance (pertes de conduction) et dans les inductances (pertes Joule et pertes magnétiques). En résumé, l'efficacité énergétique baisse drastiquement comparé à un fonctionnement en mode sain. Afin de minimiser les effets tant sur la pile à combustible que sur le convertisseur (e.g. inductances, surdimensionnement des composants), il est nécessaire d'utiliser une stratégie de tolérance aux fautes (e.g. reconfiguration du contrôle du convertisseur). Cette dernière dépend fortement des objectifs à atteindre (e.g. réduction de l'ondulation de courant au détriment du maintien du niveau de la tension du bus DC) lors des fonctionnements en mode dégradé.

### 4.2.3 Discussion sur les défauts de court-circuit

Lorsqu'un défaut de court-circuit se produit, l'énergie dissipée de l'interrupteur de puissance défectueux augmente en raison du courant élevé circulant à travers sa résistance interne. De plus, l'interrupteur de puissance peut supporter l'augmentation de la chaleur jusqu'à un seuil limite, donné en général par le fabricant. En présence d'une énergie excessive, l'interrupteur de puissance est amené à être détruit et de là conduit à un défaut de circuit ouvert [21].

## 5. Conclusion et futur travail

L'objectif principal de cet article est de comparer deux topologies de convertisseurs DC/DC en termes d'aptitude à la tolérance aux fautes sans modification de la topologie et du contrôle. Ce travail de recherche se concentre sur deux topologies entrelacées qui présentent d'importants avantages dans les applications véhicule électrique à pile à combustible. En se basant sur les résultats de simulation, la continuité de service a été prouvée pour les deux topologies en cas de défauts de circuit-ouvert. Néanmoins, la perte d'une phase conduit à l'augmentation du courant dans les phases saines et par conséquent l'ondulation de courant de la pile à combustible croît comparé à un fonctionnement en mode sain. Ce type de défaut a des effets indésirables sur la pile à combustible en termes de durée de vie, pertes et surconsommation d'hydrogène ; tandis que pour les convertisseurs DC/DC, les inductances et les interrupteurs de puissance subissent des stress additionnels et de ce fait le rendement diminue. Par la suite, en se basant sur ce travail, une méthode de diagnostic des défauts pourrait être proposée, permettant d'adopter une stratégie de tolérance aux fautes, comme par exemple la reconfiguration du contrôle en cas de défauts. De là, ce contrôle tolérant aux défauts pourrait permettre de retrouver soit un mode dégradé dit « amélioré » avec une ondulation de courant nulle ou un mode sain avec une puissance constante de la pile à combustible afin d'obtenir un meilleur rendement.

## Références

- [1] S.G. Chalk, J.F. Miller, F.W. Wagner, "Challenges for fuel cells in transport applications", *Journal of Power sources* 86, 2000, pp. 40-51.
- [2] Y. Song, "Analysis and design of high frequency link power conversion systems for fuel cell power conditioning", PhD thesis, Texas, A&M University, 2004.
- [3] 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.
- [4] A. Gaillard, P. Poure, S. Saadate, "FPGA-based reconfigurable control for switch fault tolerant operation of WECS with DFIG without redundancy", *Renewable Energy*, Vol. 55, 2013, pp. 35-48.
- [5] R. Seyezhai, B.L. Mathur, "Design and implementation of interleaved boost converter for fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 2012, pp. 3897-3903.
- [6] D. Coutellier, V.G. Agelidis and S. Choi, "Experimental verification of floating-output interleaved-input DC-DC high-gain transformer-less converter topologies", *Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008)*, 2008, pp. 562-568.
- [7] M. Kabalo, D. Paire, B. Blunier, D. Bouquain, M.G. Simoes and A. Miraoui, "Experimental Validation of High-Voltage-Ratio Low-Input-Current-Ripple Converters For Hybrid Fuel Cell Supercapacitor Systems", *IEEE Transactions Vehicular Technology*, Vol. 61, Issue. 8, 2012, pp. 3430-3440.
- [8] A. Amaral, A. Cardoso, "On-line fault detection of aluminum electrolytic capacitors, in step-down DC-DC converters, using input current and output voltage ripple", *IET Power Electronics*, Vol. 5, Issue. 3, 2012, pp. 315-322.
- [9] C. Kulkarni, G. Biswas, X. Koutsoukos, K. Goebel, J. Celaya, "Physics of Failure Models for Capacitor Degradation in DC-DC Converters", *The Maintenance and Reliability Conference (MARCON)*, 2010.
- [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] J. Lai, "A high-performance V6 converter for fuel cell power conditioning system", in: *Proc. Of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'08)*, 2005, pp. 624-630.
- [12] A. Kawamura, M. Pavlovsky, Y. Tsuruta, "State-of-the-Art High Power Density and High Efficiency DC-DC Chopper Circuits of HEV and FCEV Applications", in: *Proc of IEEE Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*, 2008, pp. 7-20.
- [13] M.Delshad, H.Farzanehfard, "A new soft switched push pull current fed converter for fuel cell applications", *Energy Conversion and Management*, 52(2) (2011), pp. 917-923.
- [14] G. Kovacevic, A. Tenconi, R.Bojoi, "Advanced DC-DC converter for power conditioning in hydrogen fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008), 2008, pp. 3215-3219.
- [15] X. Yu, M.R. Starke, L.M. Tolbert, B. Ozpineci, "Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary", *IEEE proceedings Electric Power applications* 150 (2003), 2003, pp. 643-656.
- [16] F. Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier Academic Press, 2005.
- [17] J. Larminie, A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained: Second Edition", Wiley, 2003.
- [18] J.G. Kassakian, M.F. Schlecht, G.C. Verghese, "Principles of Power Electronics", Addison-Wesley, 1991.
- [19] W. Subsingha, P. Sarakarn, "4 Phase Interleaved DC Boost Converter for PEMFC Applications", *Procedia Engineering* 32 (2012), pp. 1127-1134.
- [20] R. Seyezhai, B.L. Mathur, "Design and implementation of interleaved boost converter for fuel cell systems", *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (2012), pp. 3897-3903.
- [21] G.Y.Choe, J.S.Kim, H.S Kang and B.K.Lee, "An Optimal Design Methodology of an Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Applications", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.5, No.2, 2010, pp. 319-328.
- [22] W.K. Denson, "Reliability Assessment of Critical Electronic Components", July 1992.
- [23] L. Palma, M.H. Todorovic, P. Enjeti, "Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications", *Proceedings IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'06)*, 2006.
- [24] 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, No. 2, 2007, pp. 670-678.