

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

ETUDE ET SIMULATION DE LA REGULATION
AUTOMATIQUE DE LA TENSION D'UNE PILE A
COMBUSTIBLE CONNECTEE AU RESEAU ELECTRIQUE

Par **TEKWILEMAMA MBUZAS Nicolas**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Gradué en Sciences et Technologies Appliquées

Option : Génie Electrique et Informatique

Directeur : Msc. Ir. KAMUNDALA Janvier

Encadreur : Msc. Ir. Dieudonné MUSONGYA

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021 - 2022

Epigraphe

« L'imagination est plus importante que la connaissance »

Albert EINSTEIN

Dédicace

A toute la famille TEKWILEMAMA

TEKWILEMAMA MBUZAS Nicolas

Remerciements

Au terme de ce modeste travail de recherche, tout d'abord nous rendons grâce à Dieu, créateur de l'univers, Multivers et tout ce qui s'y trouve ;

Nous remercions nos très chers parents, pour leur loyauté prodigue et leur sacrifice désintéressé.

Ce travail constitue une expérience intense, passionnante et marquante.

Nous adressons nos sincères remerciements au Master Ingénieur KAMUNDALA Janvier pour avoir initié et soutenu notre travail et d'avoir fait preuve d'une patience et d'une attention toute particulière. Nous tenons à le remercier du temps qu'il a consacré à redonner un peu de rigueur à notre plume. Sa compétence et son pragmatisme tout d'abord, puis sa conception de la recherche et son esprit d'ouverture nous ont conduit à en tirer le meilleur parti.

Nous remercions le Master ingénieur Dieudonné MUSONGYA qui a accepté de suivre ce travail et d'en être l'encadreur.

Nous remercions aussi les enseignants du département de génie électrique et informatique de l'université Libre des Pays des Grands Lacs et à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant notre parcours scolaire et universitaire.

Enfin une pensée émue pour tous les ingénieurs et les futurs ingénieurs avec qui nous avons partagé notre parcours pendant toutes ces années passées à l'Université pour leur encouragement, plus particulièrement l'ingénieur Gloire MWENDERWA pour, sa grande générosité, et la pleine attention qu'il nous a accordée. Il a toujours été disponible pour d'intenses et rationnelles discussions.

Résumé

La pile à combustible (PAC) est connue depuis longtemps comme un convertisseur d'hydrogène en énergie (électrique + thermique) possédant de très bons rendements, les recherches sur cette technologie se développent partout dans le monde de manière considérable. Les raisons sont bien connues : la réponse aux contraintes environnementales, aux problèmes posés par la production centralisée d'électricité, la nécessité d'avoir des alternatives énergétiques. Il est certain que nous assisterons dans les prochaines décennies à l'émergence de la filière hydrogène dans notre vie quotidienne comme vecteur énergétique. Le choix de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est implicite vu les performances intéressantes (faible poids, robuste, électrolyte solide, démarrage rapide, etc. Dans ce travail, il sera question d'une étude d'impact de l'insertion d'un type des énergies renouvelables sur un réseau électrique (installation électrique) à savoir l'énergie de l'hydrogène, et plus précisément la pile à combustible. Le fonctionnement de la pile, ses caractéristiques et les technologies qui s'y réfèrent sont étudiés. Ce travail est consacré à la régulation automatique de la tension d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Le mécanisme de fonctionnement de cette pile est très intéressant : elle convertit l'énergie chimique en énergie électrique selon les réactions d'oxydo-réductions, avec un dégagement d'eau et de chaleur. Pour obtenir un réglage optimal de la tension, nous avons opté pour une méthode de contrôle en ajoutant les convertisseurs continu-continu. Nous remarquerons ensuite dans les résultats de simulation que la tension de la pile à combustible et le courant de la pile dépendent les uns sur les autres comme courbe de polarisation tension-courant de la pile

Mots clés : Pile à combustible - PEMFC - électricité – convertisseur continu-continu – régulation de la tension

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1.PROBLEMATIQUE DU TRAVAIL	1
2. HYPOTHESE DU TRAVAIL	3
3. CHOIX ET INTERET DU SUJET	3
4. METHODOLOGIE DU TRAVAIL	4
5. SUBDIVISION DU TRAVAIL	4
CHAPITRE 1	5
ÉTUDE DES IMPACTS DE L'INSERTION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE SUR UN RÉSEAU ELECTRIQUE.....	5
I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 PILES A COMBUSTIBLES	5
I.2.1 Introduction sur la pile à combustible	5
I.2.2 Fonctionnement d'une pile à combustible : cas de la PEMFC	8
I.2.2.1 Principe de fonctionnement d'une PAC	8
I.2.2.2 Piles PEMFC	11
I.2.2.3 Système à pile à combustible.....	12
I.2.3 Les applications des piles à combustible et les prototypes actuels.....	13
I.2.4 Accroître les performances et la durabilité des produits existants	15
I.3 ÉTUDE DES IMPACTS SUR LE PROFIL DE LA TENSION.....	17
I.3.1 Les surtensions induites par la connexion d'une pile à combustible	17
I.4 CONCLUSION	19
CHAPITRE 2	20
CONCEPTION DU SYSTÈME DE CONTROLE	20
2.1 INTRODUCTION	20
2.2. PRESENTATION DU SYSTEME DE PUISSANCE	21
2.2.1. Architecture du système.....	21
2.2.2. Structures des convertisseurs continu-continu pour la liaison de la pile avec le bus continu S	23

2.2.3. Structures des convertisseurs continu-continu pour la liaison batteries ou supercapacités avec le bus continu	26
2. 3 Interconnexion au réseau	27
2.4. CONCLUSION	29
CHAPITRE 3	30
PRESENTATION DES RESULTATS DE SIMULATION.....	30
3.1 INTRODUCTION	30
3.2 CONVERTISSEURS DE PUISSANCE DC DC A PONT COMPLET	30
3.3 PRESENTATION DES RESULTATS	32
3.4 CONCLUSION PARTIELLE	35
CONCLUSION GENERALE	36

Liste des abréviations

AFC	Pile A Combustible Alcaline.
BT	Basse Tension
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
DIR	Reformage Interne Direct
MCFC	Pile A Combustible A Carbonates Fondus.
MR	MicroRéseau
PAC	Pile A Combustible.
PAFC	Pile A Combustible A Acide Phosphorique.
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PEMFC	Pile A Combustible A Membrane Echangeuse De Protons.
SC	SuperCondensateur
SER	Sources d'Energies Renouvelables
SOFC	Pile A Combustible A Oxydes Solides.
SVM	Space Vector Modulation
Vpile	Tension de la pile

Liste des figures

Figure 1 : Comparaison des chaînes de conversion chimique/électrique traditionnelle et à PAC[3]..	7
Figure 2 : Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible.	9
Figure 3: Représentation simplifiée d'une électrode.....	10
Figure 4: Exemple d'un Système PAC pour le transport automobile [3].	13
Figure 5: Chargeur nomade de téléphone portable composé d'une cartouche H2 jetable (PAC PEMFC miniature (boîtier noir) développée au CEA). [11]	14
Figure 6: Courbe de polarisation typique et mise en évidence des trois surtensions (activation, ohmique et de concentration) limitant les performances d'une PAC [3] :	16
Figure 7: Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans PAC	17
Figure 8: Exemples de topologie des systèmes électriques à pile à combustible.	22
Figure 9: Convertisseur continu-continu. (a) Survolteur de base ; (b) Mise en parallèle de deux survolteurs avec inductances couplées [11].	24
Figure 10: Convertisseurs continu-continu avec transformateur asymétrique, Flyback (à gauche) et Forward (à droite).....	25
Figure 11: Convertisseurs continu-continu avec transformateur symétrique. Différentes structures, onduleurs (à gauche) et redresseurs (à droite).	25
Figure 12: Convertisseur continu-continu. Fonctionnement en commutation douce.	26
Figure 13: Exemple de convertisseur continu-continu bidirectionnel pour batteries.....	27
Figure 14: Diagramme bloc du système à pile à combustible.....	27
Figure 15: Diagramme bloc du reformer de la pile	28
Figure 16: Modèle de circuit électrique équivalent de la PAC	28
Figure 17: Modèle Simulink de convertisseurs de puissance DC à DC a pont complet avec la pile à combustible et la batterie.....	30
Figure 18: Simulation des formes d'ondes tension-courant de la PAC	33
Figure 19: Simulation des formes d'ondes tension du PAC-tension batterie	34
Figure 20: Simulation des formes d'ondes sous une augmentation soudaine de la charge.....	35

INTRODUCTION GENERALE

1.PROBLEMATIQUE DU TRAVAIL

Actuellement, l'opinion publique commence à s'intéresser à la problématique du changement climatique et les états prennent des résolutions pour protéger l'environnement. D'ailleurs, le protocole de Kyoto, qui vise à réduire les émissions globales de gaz à effet de serre, favorise un fort accroissement de la production d'électricité basée sur des ressources renouvelables, qui est majoritairement de faible puissance individuelle. Ces grandes évolutions récentes touchant l'industrie de l'énergie électrique conduisent aujourd'hui à une arrivée croissante d'insertion de production d'énergie dans les réseaux de distribution. Cette production est le fait d'une multitude de producteurs indépendants.

Cependant, une des conséquences de la dérégulation des marchés électriques est la connexion d'une façon significative de nouveaux moyens de production. Ceux-ci sont très diversifiés (éolienne, centrale de co génération, capteurs photovoltaïques, piles à combustible, etc.) au sein des réseaux électriques existants.

Cette dérégulation conduit aujourd'hui à une arrivée massive d'insertion de production d'énergie dans les réseaux électriques. Cette production est le fait d'une multitude de producteurs indépendants qui, après une étude de raccordement préalable au réseau électrique, peuvent produire et vendre leur énergie sur le marché. Ces producteurs, généralement, sont désignés sous le terme de « Génération d'Énergie Renouvelables » ou (GER)

D'ailleurs, les générateurs d'énergie ont toujours existé dans les réseaux mais leur présence n'était pas assez significative pour avoir un impact sur la sûreté de fonctionnement des réseaux.

Aujourd'hui, la situation est différente. Le nombre de producteurs d'énergie renouvelable augmente de manière importante, tandis que les investissements sur les réseaux électriques ont diminués. Or, au-delà d'une certaine masse critique, les générateurs ont des impacts négatifs sur le fonctionnement adéquat des réseaux. Les principaux points négatifs sont [3] :

- ~ des impacts sur le fonctionnement des protections dus à la modification des Transits de puissance et des courants de court-circuit ;
- ~ déstabilisation du système électrique ;
- ~ apparition des flux d'énergie réactive ;
- ~ risque de congestion ;

- ~ des impacts sur les niveaux de tension ;
- ~ fermeture des grandes centrales ;
- ~ chute de tension ou surtension non permise par le code électrique ;
- ~ des impacts sur la stabilité des réseaux et sur les temps critiques d'élimination de défauts.

L'étude de ces impacts est nécessaire pour que l'insertion massive des sources d'énergie renouvelable au sein des réseaux existants se fasse sans dégradation en terme de qualité et des performances du fonctionnement des réseaux.

Compte tenu de cette situation, l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie apparaît actuellement comme une solution très prometteuse pour l'avenir. En voici les raisons [1] :

- Bien que n'existant pas à l'état naturel, les ressources potentielles en hydrogène sont très importantes.
- L'hydrogène permettrait de solutionner le problème de stockage en grande quantité de l'électricité, ce qui constituerait une avancée significative pour le développement des véhicules électriques pour lesquels le stockage est une contrainte majeure. De plus, on pourrait avoir recours aux énergies renouvelables comme sources d'énergie principales en utilisant conjointement une Pile A Combustible (PAC) et l'électrolyse pour fabriquer son combustible l'hydrogène.
- L'utilisation d'hydrogène conduit à des rendements élevés. En effet, la transformation de l'hydrogène en énergie électrique via une PAC permettrait d'améliorer notablement les rendements obtenus avec les générateurs actuels.
- A tout cela, il faut ajouter qu'une correcte utilisation de l'hydrogène permettrait de réduire ostensiblement les émissions globales des gaz à effet serre.

Dans tous les cas, l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie passe nécessairement par l'utilisation et le développement des PAC. Les PAC, basées sur la réaction inverse de l'électrolyse, permettent non seulement la génération d'électricité à de très hauts rendements mais aussi la génération de chaleur. En plus, la PAC fonctionnant avec de l'hydrogène et de l'oxygène, ne donne pas lieu à des émissions polluantes.

Pour mener nos recherches nous nous sommes posés les questions suivantes :

- Pourquoi insérer une pile à combustible dans un réseau électrique ?
- Quel est l'importance majeure de la régulation de la tension d'une pile à combustible

2. HYPOTHESE DU TRAVAIL

Etant donné que les hypothèses sont des réponses anticipées aux questions de recherche, voici donc quelques pistes de solutions que nous allons exploiter et analyser tout au long de notre travail :

- Notre initiative d'insérer une pile à combustible dans un réseau électrique consiste à préserver la sûreté du système électrique, garantir une continuité de service et maintenir la qualité de fourniture de l'énergie électrique, tout en continuant à favoriser la connexion de production d'énergie
- La connexion d'une pile à combustible comme moyen de production nécessite un dispositif d'électronique de puissance (onduleur). Ce dispositif risque de dégrader la qualité de l'énergie par injection d'harmoniques. Cette dégradation est à prendre en compte et doit être étudiée afin de quantifier les problèmes éventuels sur les consommateurs et pour trouver des solutions adéquates (filtres passifs et/ou actifs).

3. CHOIX ET INTERET DU SUJET

Notre investissement dans le domaine de la régulation automatique de la tension d'une pile à combustible connectée à un réseau électrique est sans doute motivé par la multiplicité et la variété des avantages qu'offre une pile à combustible dans son application stationnaire.

Les piles à combustibles sont une solution propre pour la production d'électricité dans notre quotidien et surtout dans l'avenir.

On cite parmi ces avantages [6] :

1. Rendement énergétique élevé
2. Limitation des émissions à effet de serre
3. Diverses températures de fonctionnement
4. La chaleur dégagée peut être utilisée dans des applications domestiques ou industrielles
5. Fiabilité
6. Fonctionnement silencieux, réduction du bruit dans les véhicules
7. Alimentation aisée des sites isolés
8. Grande autonomie et recharge rapide pour les installations portables

9. Possibilité d'utilisation dans un système hybride pile-photovoltaïque par exemple ou pile photovoltaïque-éolienne

4. OBJECTIFS GLOBAL ET SPÉCIFIQUES

Pratiquement, ce travail a pour objectif général de concevoir un système pouvant contrôler et gérer l'énergie d'une façon optimale.

Avec ce système nous seront donc capables de contrôler l'alimentation des installations du réseau et gérer ainsi l'énergie produite par le multi-source

5. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Pour atteindre nos objectifs, nous envisageons utiliser des méthodes et techniques telles que :

- La méthode d'observation : cette méthode va nous aider avoir une vue d'ensemble sur les divers systèmes de régulation de la tension des générateurs d'énergies qui existent déjà. Et elle va nous donner des idées générales sur notre système que nous devons mettre en place.
- La technique documentaire : qui nous permet d'approfondir nos connaissances en fréquentant les bibliothèques pour la lecture des livres, des travaux de nos prédécesseurs et en consultant la documentation sur internet afin de voir ce qui existe déjà et ce qui a déjà été fait en rapport avec le sujet.
- La technique expérimentale va sans doute suivre et des tests vont être effectués par des simulations avec des logiciels bien adaptés d'électronique pour enfin tirer des conclusions effectivement en phase avec notre sujet.

6. SUBDIVISION DU TRAVAIL

Hormis l'introduction et la conclusion, notre travail s'étend sur trois chapitres dont :

- Le premier chapitre aborde les différents impacts de l'insertion d'une pile à combustible sur un réseau électrique. Pour cela, des formules expliquerons le profil de la tension sur un réseau électrique BT.
- Le second se base essentiellement sur le système de contrôle pour la régulation automatique de la tension d'une pile à combustible
- Le dernier se consacre sur les résultats de simulation

CHAPITRE 1

ÉTUDE DES IMPACTS DE L'INSERTION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE SUR UN RÉSEAU ELECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION

L'énergie produite par une pile à combustible est destinée à être produite localement (au plus près des centres de consommation) et n'est donc pas destinée à être transportée sur de grandes distances. Elle peut s'étaler de quelques kilowatts à quelques mégawatts et peut également être couplée avec de la production de chaleur (co génération). La connexion de cette génération d'énergie dispersée est prévue dans la majorité des cas dans les réseaux de distribution selon l'ordre de grandeur des puissances injectées. L'insertion croissante de cette génération d'énergie au sein du système électrique existant n'est pas sans impact sur l'exploitation et le fonctionnement de ce dernier. Elle présente un véritable défi par les multiples incertitudes actuelles sur les capacités d'intégration de telles productions dans le système, avec tous les problèmes qui y seront engendrés et les adaptations nécessaires à opérer sur le système actuel. Dans les paragraphes suivants, plusieurs de ces impacts vont être présentés.

I.2 PILES A COMBUSTIBLES

I.2.1 Introduction sur la pile à combustible

Dans la dernière partie du XXe siècle, l'avènement des PAC s'inscrit dans une évolution globale au travers des siècles de la production d'énergie dictée par quatre grandes contraintes [5] :

- la recherche d'un vecteur énergétique unique et généralisé facilement convertible en d'autres formes d'énergie plus apte à répondre aux divers besoins de l'homme (transport, chauffage, communications) ; l'électricité est le candidat retenu, car il est facile de la produire et de la transporter, mais elle a le gros inconvénient d'être difficile à stocker ;
- la recherche d'une diversification des énergies primaires pour limiter les dépendances énergétiques en particulier vis-à-vis des énergies fossiles (pétrole ou gaz) ;
- l'augmentation des rendements des convertisseurs y compris dans le transport ;

- la contrainte environnementale, elle-même déclinable en deux sous-contraintes : d'une part, la limitation des émissions polluantes à durée de vie courte (pollution locale : CO, NO_x, HC, particules...) et, d'autre part, la limitation des émissions de polluants à durée de vie longue et en particulier ceux à effet de serre (pollution globale).

L'utilisation des PAC reste indissociable de l'élément hydrogène qui, à défaut d'être disponible tel quel, présente l'avantage d'être un composé chimique transportable, stockable et qui peut être produit à partir d'énergies renouvelables diversifiées. Au sens du rendement de la chaîne de conversion énergétique, une approche simpliste du problème fait apparaître la PAC comme plus prometteuse par principe que les convertisseurs « électrothermiques » (électro diésel, électro turbine) [3].

Le nombre d'étapes de la transformation énergétique et de composants nécessaires semble être moindre que dans le cas du passage par une conversion chimique/électrique traditionnelle comme le montre la Figure 1.

L'autre intérêt en particulier pour les PAC à haute température est d'être intégrable à un cycle de conversion dit « combiné » où l'on met en cascade une PAC et une ou deux turbines à gaz ou vapeur. Le rendement électrique global peut alors monter jusqu'à 80 %. D'autre part, du fait de sa modularité, la PAC s'intègre bien dans les stratégies actuelles d'accompagnement des grands réseaux de distribution électrique par des sources d'énergie locales, de faible puissance [3].

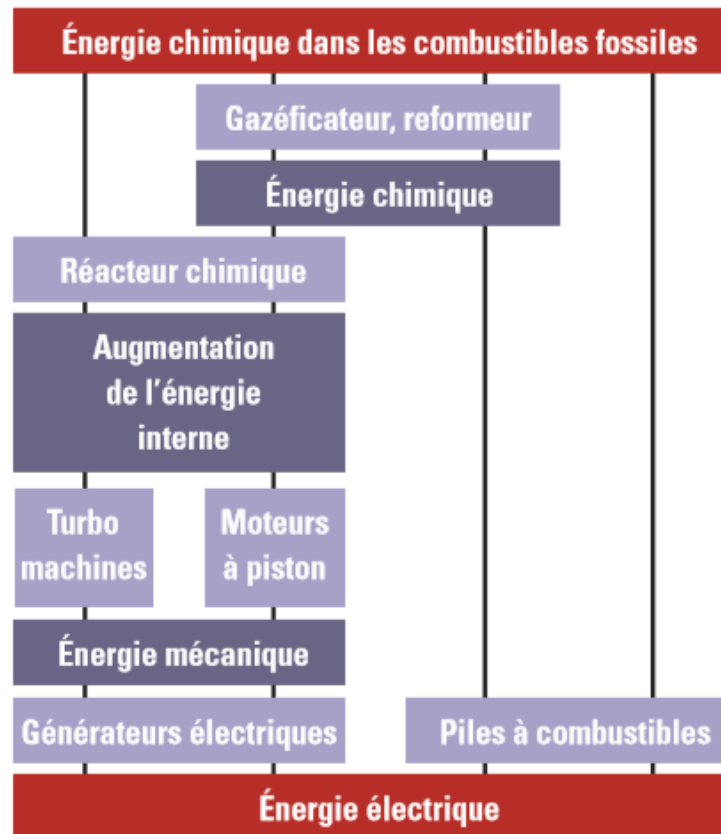


Figure 1 : Comparaison des chaînes de conversion chimique/électrique traditionnelle et à PAC[3].

Le défi à relever pour les PAC, comme pour toute nouvelle chaîne énergétique est de répondre aux cinq critères suivants :

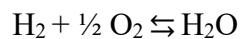
- la qualité du service ;
- la commodité du service ;
- le rendement économique de la chaîne délivrant le service ;
- le rendement énergétique de celle-ci ;
- la qualité « environnementale » de la chaîne énergétique délivrant le service.

Le critère coût est le plus difficile à respecter actuellement, sachant que les solutions concurrentes (thermiques) ont plusieurs générations d'avance et occupent les marchés actuels. L'application à la traction automobile illustre bien cette problématique [2].

I.2.2 Fonctionnement d'une pile à combustible : cas de la PEMFC

I.2.2.1 Principe de fonctionnement d'une PAC

Une PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et thermique. La réaction mise en œuvre est une réaction électrochimique entre l'hydrogène H_2 (carburant) et l'oxygène O_2 (comburant) avec production simultanée d'eau, d'électricité et de chaleur selon la réaction globale des synthèses de l'eau [1] :



Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur ou les hydrocarbures. Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température, les carburants traditionnels s'avérant trop peu réactifs à ces températures.

On présente ci-après le principe de fonctionnement d'une pile à combustible à électrolyte polymère. Toutefois le principe de base reste le même pour les autres technologies de pile à combustible [8].

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte cathode qu'on nomme communément cellule comme représenté sur la figure 2. Cet empilement est contenu entre deux plaques bipolaires qui, par un système de rainure, assurent une arrivée des gaz combustible et comburant de manière homogène sur toute la surface des électrodes.

L'hydrogène entre dans la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Les gaz sont amenés sur les électrodes par des couches de diffusion, hydrophobes et conductrices qui permettent d'une part l'alimentation en gaz sur toute la surface des électrodes et d'autre part un contact électrique entre la couche réactive et la plaque bipolaire.

Déposées directement sur la membrane, les couches réactives contiennent des nanoparticules de platine déposées sur du carbone comme représenté sur la figure 3.

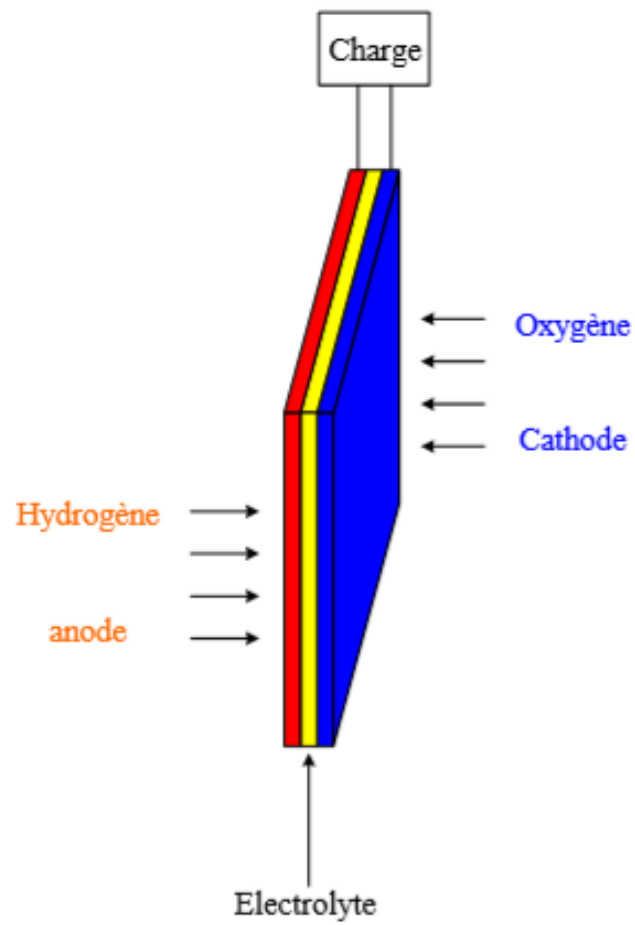


Figure 2 : Représentation schématique d'une cellule de pile à combustible [7].

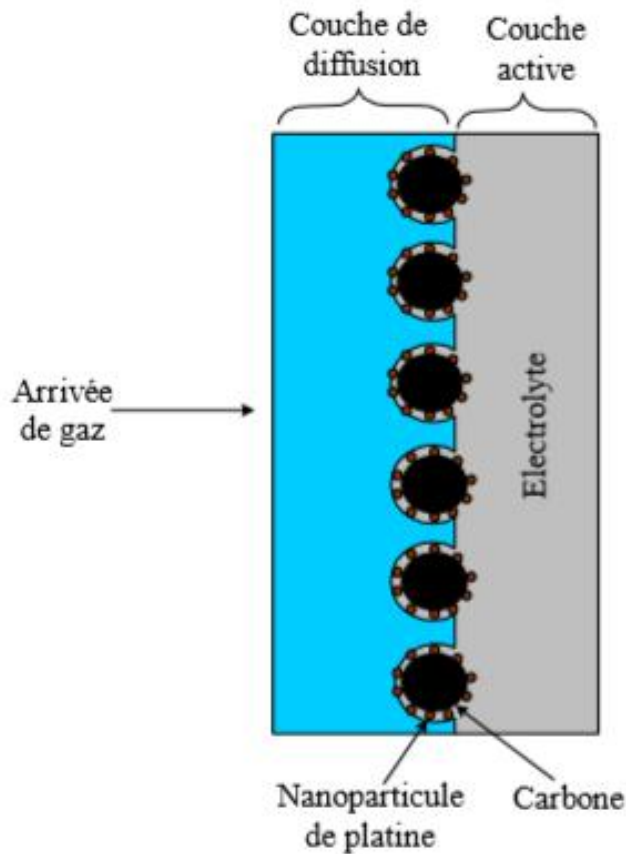
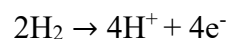


Figure 3: Représentation simplifiée d'une électrode [7].

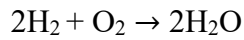
La réaction chimique comprend deux demi-réactions séparées : une demi-réaction d'oxydation au niveau de l'anode et une demi-réaction de réduction au niveau de la cathode. L'inconvénient est que la réduction de l'oxygène est lente aux basses températures de fonctionnement, typiquement 80°C au niveau du cœur de pile. Pour cela, le platine est utilisé comme catalyseur au niveau des électrodes pour augmenter la vitesse de chaque demiréaction :

- lors de la demi-réaction d'oxydation, l'hydrogène gazeux produit des protons qui se déplacent à travers la membrane conductrice ionique vers la cathode et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur qui consomme l'énergie générée par la cellule :



- lors de la demi-réaction de réduction, l'oxygène se combine avec les protons et les électrons pour donner de l'eau :

Le bilan de la réaction est donc, avec une production de chaleur :



Le même processus, à savoir l'oxydation d'un combustible et la réduction de l'oxygène, régit toutes les technologies de piles à combustible. On présente dans le tableau I.1 les réactions électrochimiques mises en jeu par chaque technologie de pile à combustible.

Table 1 : Réactions électrochimiques de chaque technologie de piles à combustible [12].

PILE A COMBUSTIBLE	REACTION A L'ANODE	REACTION A LA CATHODE
AFC	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
PEMFC et PAFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
MCFC	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
SOFC	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

I.2.2.2 Piles PEMFC

Dans le cas des piles de technologie PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell ou pile à membrane échangeuse de protons), le lien entre ces deux demi-réactions est réalisé par une membrane électrolyte conduisant les protons H^+ . Le principe de fonctionnement nécessite une cellule élémentaire comprenant une anode, une cathode, un électrolyte ainsi que les alimentations en combustible et comburant (fig. 2) Le circuit électrique externe est également représenté. Les réactions mises en œuvre sur chaque électrode sont :

à l'anode $\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

à la cathode $1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$

bilan $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$

Pour que ces réactions aient lieu aux températures de fonctionnement d'une pile PEMFC, l'ajout d'un catalyseur dans les électrodes est nécessaire. Le meilleur catalyseur reste aujourd'hui le platine [13].

La production d'énergie électrique s'accompagne de pertes thermiques qu'il convient d'évacuer par l'intermédiaire d'un circuit de refroidissement. La cellule élémentaire de PAC est un montage constitué d'un assemblage membrane électrodes (noté AME), inséré entre deux collecteurs de courant ou plaques bipolaires. Ces dernières permettent le passage des fluides, y compris celui de refroidissement et assurent l'étanchéité entre les trois circuits fluidiques. Une pile proprement dite est un empilement de ces cellules élémentaires, connectées en série d'un point de vue électrique, et en parallèle d'un point de vue hydraulique. Les plaques bipolaires séparent deux AME adjacents et permettent leur connexion électrique.

I.2.2.3 Système à pile à combustible

Un système à PAC modélisé sur la figure 4, ou module de puissance est un système réalisant de façon autonome la conversion de l'énergie de combustion d'un carburant en énergie électrique directement utilisable. Pour cela, la pile est accompagnée d'équipements auxiliaires pour que sa fonction principale, la fourniture d'énergie électrique, puisse être remplie. Ces composants assurent l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits, de la chaleur, la conduction et la transformation de l'électricité au profit des équipements consommateurs électriques (moteur électrique, auxiliaires divers...) [7]. Suivant la nature de la pile et son application (notamment son combustible) l'environnement devra être adapté avec :

- la gestion des apports en combustible et comburant avec une étape de pré-reformage éventuelle et/ou une mise sous pression pour les PEMFC ;
- la gestion thermique avec des plaques bipolaires à circuit liquide ou air pour le refroidissement des PEMFC ou l'utilisation de la chaleur fournie pour la SOFC pour réchauffer les gaz en entrée ;

- la gestion électrique pour la transformation du courant continu délivré par la pile en courant alternatif au voltage désiré. Enfin, pour les applications transport, la chaîne de traction électrique est constituée de l'ensemble des systèmes intervenant dans la conversion d'énergie, depuis la sortie du réservoir de carburant jusqu'aux roues. Le groupe électrogène à pile à combustible est l'un des éléments principaux de cette chaîne de traction, où l'on peut distinguer deux autres composants majeurs : le groupe motopropulseur et l'éventuel stockage secondaire [6]

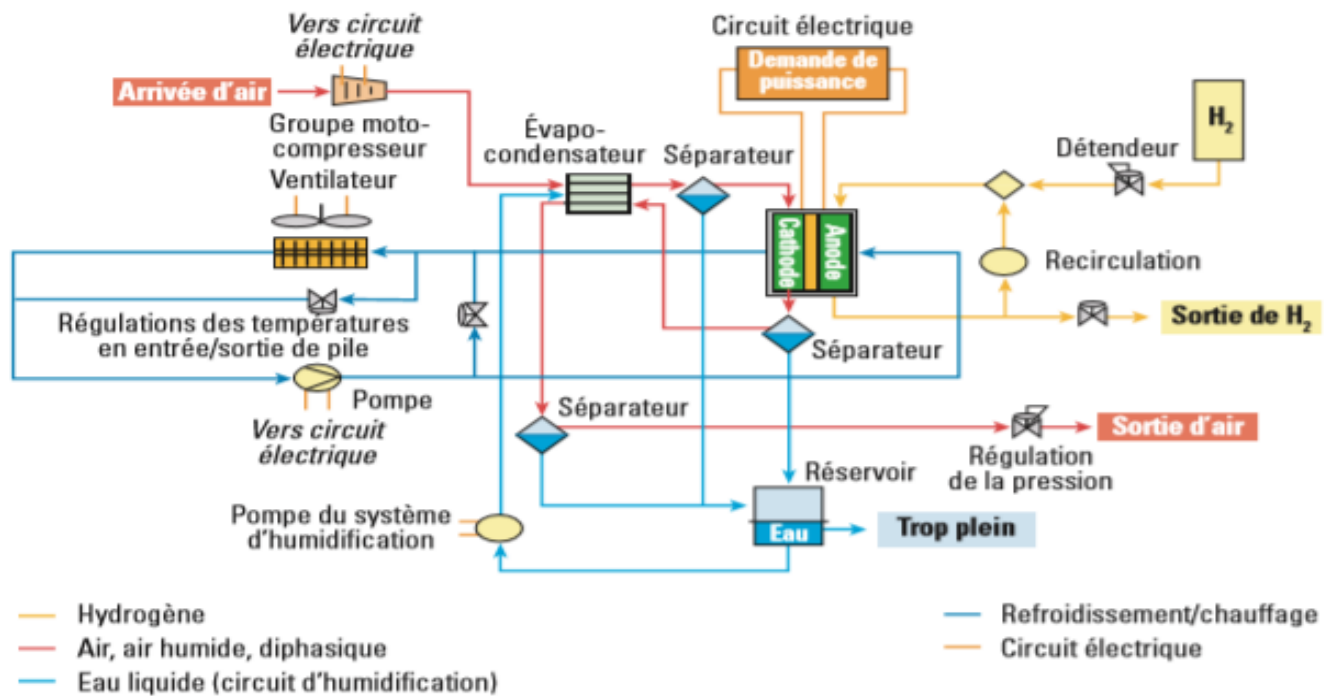


Figure 4: Exemple d'un Système PAC pour le transport automobile [3].

I.2.3 Les applications des piles à combustible et les prototypes actuels

Même si l'état de développement des PAC se situe encore pour beaucoup au stade de la recherche et développement, le nombre de démonstrateurs, de prototypes, voire de systèmes commercialisés ne cesse d'augmenter. Grâce à leur propriété de modularité et aux différentes technologies développées, les PAC peuvent s'appliquer avantageusement à presque tous les domaines de puissance du watt à plusieurs mégawatts. On les retrouve donc dans [9] :

- **Le transport :** La PAC trouve dans le marché de la flotte captive un environnement très propice à son développement. En effet, il s'agit d'un environnement industriel habitué à respecter des consignes de sécurité inhérentes à l'utilisation de l'hydrogène et pour lequel le critère environnemental de réduction locale des émissions de polluant est majeur.
- **Le stationnaire :** La dérégulation de l'énergie favorise l'implantation de centrales électriques décentralisées, marché sur lequel la pile à combustible a de légitimes espoirs de développement. Certains bureaux de poste, des banques, des centres informatiques et diverses entreprises profitent déjà de cet approvisionnement énergétique très sûr, sans interruptions, et décentralisé, fourni par les piles à combustible, ou en font usage comme générateur de secours.
- **Les applications nomades :** Depuis 2000, on assiste à une course à la miniaturisation des PAC en vue de concurrencer l'autonomie et la durée de vie des batteries. Cette miniaturisation concerne les piles de type PEM ou DMFC qui peuvent alors être utilisées pour faire fonctionner n'importe quel appareil, de l'ordinateur portable au chargeur de téléphone portable. Pour la PEM, le principal verrou reste le stockage de l'hydrogène. à l'exemple de la figure 5



Figure 5: Chargeur nomade de téléphone portable composé d'une cartouche H₂ jetable (PAC PEMFC miniature (boîtier noir) développée au CEA). [11]

I.2.4 Accroître les performances et la durabilité des produits existants

Le niveau de performance d'un système à pile à combustible est le résultat d'une optimisation entre les paramètres de fonctionnement de la pile (température, pression, humidité des gaz), les points de fonctionnement et la consommation d'énergie associée des différents auxiliaires. L'amélioration sensible des performances (en termes de puissances volumique et massique et de rendement) et de la durabilité passera donc par un développement spécifique de composants adaptés aux plages de fonctionnement des différentes technologies de PAC et permettant, par une meilleure intégration de la pile dans le système, de trouver un équilibre entre les contraintes appliquées à la pile et aux auxiliaires. La performance et la durabilité des piles ne pourront être améliorées qu'à partir de la connaissance approfondie des propriétés et des mécanismes de fonctionnement et de vieillissement de chaque composant des PAC et de leurs interactions mutuelles. La figure 6 illustre une courbe de polarisation représentative d'une PAC. Le cas idéal est représenté par la droite horizontale en bleu clair en arrière-plan et le cas réel par la courbe en vert au premier plan. L'écart entre ces deux courbes représente l'énergie chimique dissipée en chaleur et donc non transformée en électricité. Ces limitations sont de trois natures : la surtension d'activation (région 1), la surtension ohmique (région 2) et la surtension de concentration (région 3). La surtension d'activation (région 1) observée aux faibles densités de courant traduit une limitation des cinétiques de mécanismes réactionnels aux électrodes (transfert de charge), notamment celles liées à la réduction de l'oxygène à la cathode. Améliorer les performances conduirait à décaler la courbe i - V vers le haut. Ceci peut être atteint en augmentant [11] :

- la quantité de catalyseur platine (Pt) mais cela est incompatible avec les aspects économiques,
- la surface d'échange du catalyseur par l'optimisation de la taille des particules (aujourd'hui nanométriques) de catalyseur,
- la température de fonctionnement des piles PEMFC, ce dernier point impliquant de changer d'électrolyte. La surtension de concentration (région 3) observée aux fortes densités de courant traduit une limitation liée à des phénomènes de transport. La quantité de gaz (H_2 , air) et d'eau produite est proportionnelle au courant délivré par la pile. Il convient donc aux fortes densités de courant d'assurer à la fois l'arrivée d'une grande quantité de gaz au niveau des électrodes et l'évacuation hors de la pile de l'eau produite. Le risque est d'immerger les sites réactionnels des électrodes et donc d'empêcher les réactions électrochimiques (on parle alors de « noyage » de la

pile). Améliorer les performances conduirait à décaler la courbe i - V vers les plus fortes densités de courant. Ceci peut être atteint en adaptant la morphologie et l'hydrophobicité de la couche de diffusion en contact avec les électrodes dans l'AME et la géométrie des plaques bipolaires. La surtension ohmique (région2) traduit une limitation de la conduction électrique (électrodes, plaque bipolaire) et/ou ionique (électrolyte) dans les différentes parties de la pile. Dans les piles PEMFC, la chute ohmique au travers de la membrane polymère peut varier entre 5 % et 20 % de la tension aux bornes de la pile en fonction de l'épaisseur et de la teneur en eau de la membrane.

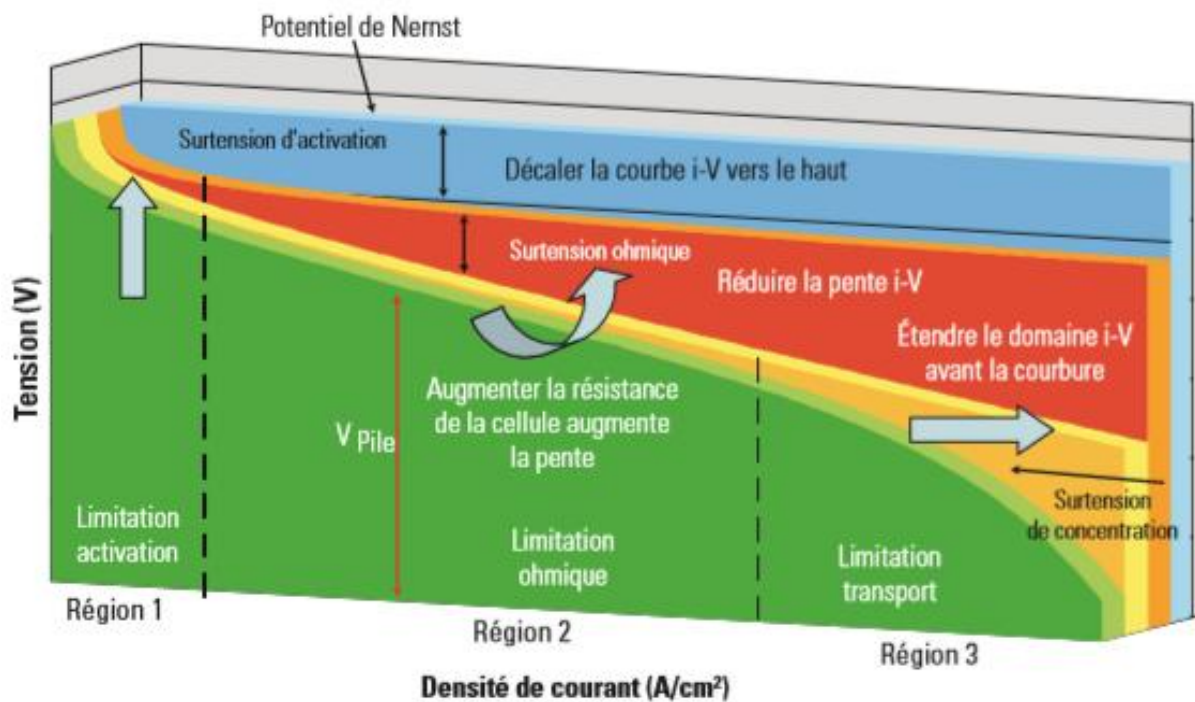


Figure 6: Courbe de polarisation typique et mise en évidence des trois surtensions (activation, ohmique et de concentration) limitant les performances d'une PAC [3] :

I.3 ÉTUDE DES IMPACTS SUR LE PROFIL DE LA TENSION

Les générateurs d'énergie modifient aussi le plan de tension des réseaux électriques. En fait, le dimensionnement du réseau est réalisé de manière à avoir une chute de tension admissible sur toute la longueur des départs. Ainsi, en l'absence de production d'énergie, la tension décroît progressivement avec la distance du poste source vers le dernier consommateur en fonction de l'impédance des câbles et des charges. L'ajout d'un ou plusieurs producteurs d'énergie peut créer localement une ou plusieurs élévations de tension. Ces élévations peuvent se transformer en surtensions et dépasser les limites admissibles par le code électrique, notamment en cas de faible charge sur le réseau [4].

I.3.1 Les surtensions induites par la connexion d'une pile à combustible

Afin d'illustrer l'impact d'une PAC dans un réseau, la formule de la chute de tension entre deux nœuds d'une portion de la ligne d'un réseau BT a été utilisée. La figure 7 illustre un circuit d'une ligne électrique composée d'une impédance RL. Aussi, la représentation vectorielle de ce circuit est illustrée sur le digramme de Fresnel reliant les diverses grandeurs du système entre elles, soient : (la tension d'entrée U_e , la tension de sortie U_s , le courant I qui circule dans la ligne).

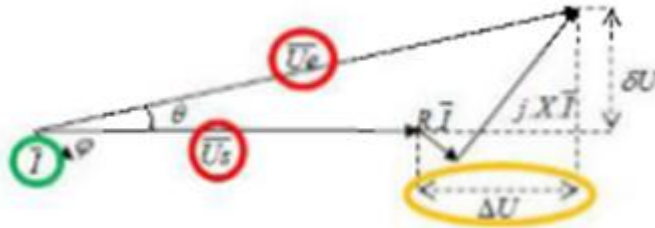


Figure 7: Chute de tension aux bornes d'une impédance RL sans PAC

Si on considère que l'hypothèse de Kapp est valide, la chute de tension sans la présence du PAC est la différence entre la tension d'entrée U_e et la tension de sortie U_s qui peut être calculée après projection à l'aide de la formule (1.1) suivante :

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + L \cdot \omega \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (1.1)$$

Ainsi, si nous considérons le flux de puissance active et réactive qui circule dans la ligne, la formule de la chute de tension devient :

$$\Delta U = \frac{R.P_e + L\omega.Q_c}{U} \quad (1.2)$$

La chute de tension entre le poste source et le point de raccordement de la PAC via une ligne est exprimée à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta V = \frac{R.P_N + Q_N}{V_N} \quad (1.3)$$

Avec : - R est la résistance totale de la ligne ;

- L est l'inductance totale de la ligne ;

- V_N est la tension au nœud N ;

- f_i est le courant transitant dans la ligne ;

- P_N, Q_N les puissances active et réactive au nœud N ;

- P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournie par la PAC ;

- P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation ;

- Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation.

L'équation ci-dessus illustre un des principaux problèmes liés à la connexion d'une PAC sur un réseau.

En effet, l'injection de puissance, active ou réactive va induire une élévation de la tension au nœud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseau auxquels elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par la PAC, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée ou limite admissible par le code électrique.

I.4 CONCLUSION

Nous avons étudié le fonctionnement et les enjeux d'une PAC et l'impact de son insertion des générateurs dans un réseau électrique. En fait, le réseau électrique existant, de par son architecture et sa conception, n'est pas adapté pour un accueil significatif de cette production d'énergie.

Ainsi, le fait de produire une quantité de puissance localement sur un réseau crée des problèmes de tension au point de connexion (élevations de tension). Cette surtension s'étend aux nœuds voisins et peut, selon les niveaux de charge du réseau, devenir critique. D'ailleurs, la connexion de producteurs d'énergie peut induire une inversion du flux de puissance sur le réseau. Ils deviennent donc bidirectionnels. Ceci fait donc apparaître des problèmes d'incompatibilité entre la situation actuelle du réseau et la présence du générateur d'énergie sur celui-ci.

Donc, il apparaît nécessaire de penser à des solutions de réglage de tension et de puissance afin de solutionner cette problématique de surtension.

Le chapitre suivant se base sur la conception du système de contrôle pour la régulation automatique de la tension d'une pile à combustible.

CHAPITRE 2

CONCEPTION DU SYSTÈME DE CONTROLE

2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présentera en détail la conception d'un système de contrôle (pile à combustible et batterie). Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible et difficilement exploitable malgré d'importants efforts pour empiler en série le plus grand nombre de cellules élémentaires [6]. Si l'on considère à ce jour les limites technologiques, le nombre de cellules que l'on peut mettre en série est de l'ordre d'une centaine. On obtient donc une tension variant entre quelques volts et 100 V. Pour beaucoup d'applications, cette tension est insuffisante. On est alors amené à placer un convertisseur entre la pile et la charge électrique dont le premier rôle est d'élever la tension délivrée par la pile. Cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons tout particulièrement aux convertisseurs continu continu non réversible qui peuvent être utilisés comme interface entre une pile à combustible et une charge électrique. C'est la partie la plus importante de la chaîne de conversion pile charge puisqu'elle conditionne directement la durée de vie de la pile à combustible. En effet, parmi les différents phénomènes altérant la durée de vie des piles à combustible, l'ondulation du courant et les harmoniques contenus dans ce dernier sont parfois cités [8], même si sur ce point les avis sont partagés. Ils sont directement liés à l'architecture du convertisseur placé en aval de la pile à combustible.

Dans un premier temps, nous présentons les différentes topologies d'un système à pile à combustible comportant une pile à combustible, un éventuel élément de stockage (batteries et/ou super capacités) et une charge électrique. Nous présentons et analysons ensuite quelques structures de base de convertisseurs continu-continu pour la liaison entre la pile à combustible et le bus continu puis la liaison entre l'élément de stockage et le bus continu. Plusieurs autres structures en découlent dont l'objectif est d'optimiser la structure de base.

2.2. PRESENTATION DU SYSTEME DE PUISSANCE

2.2.1. Architecture du système

Dans cette section, les systèmes de génération distribuée avec la batterie en parallèle avec la pile à combustible seront étudiés. La conception du système de contrôle des convertisseurs de puissance CC-CC à pont complet, des onduleurs CC-CA triphasés sans ou avec un transformateur Δ/Y sera présentée pour trois configurations dans une centrale électrique autonome (une seule unité DGS et deux unités DGS) et un SGD connecté au réseau

La pile à combustible peut être considérée comme une source de tension continue variable avec une impédance interne élevée. Différentes topologies peuvent être envisagées selon que l'alimentation finale est en continu ou en alternatif, qu'un élément de stockage d'énergie tampon est envisagé ou non et que la pile à combustible délivre une tension basse ou élevée [13].

D'un point de vue général, nous sommes amenés à connecter ensemble une pile à combustible, un élément de stockage et une charge électrique que nous supposons alternative. Dans le cas d'une charge alimentée en continu, nous faisons l'économie du convertisseur continu alternatif placé à droite sur les différents schémas.

Différentes architectures peuvent être définies selon la tension de sortie de la pile. Si la pile à combustible est basse tension et que le bus continu est haute tension, on devra placer un convertisseur unidirectionnel entre la pile et le bus continu comme représenté à la figure 8 a, b. Si la pile est haute tension, nous pouvons faire l'économie de ce convertisseur comme représenté à la figure 8 c. Cependant, dans le cas où la pile est directement connectée sur le bus continu, celui-ci a un niveau de tension fluctuant et un convertisseur doit être placé entre l'organe de stockage et la pile quelle que soit la tension de sortie de l'organe de stockage.

Pour l'organe de stockage, permettant, d'une part, de récupérer de l'énergie réinjectée sur le bus continu (freinage récupératif par exemple) ou de l'énergie destinée à recharger ces éléments et, d'autre part, de lisser les appels de puissance de la pile à combustible, on a comme pour la pile la nécessité ou non d'utiliser un convertisseur selon que cet élément est basse tension comme représenté à la figure 8 (a, c) ou haute tension comme représenté à la figure 9 b.

Côté charge, un convertisseur continu-alternatif classique permet d'alimenter la charge alternative. Ce convertisseur est bidirectionnel et doit permettre d'échanger de la puissance dans les deux sens afin de fonctionner en mode récupératif ou de permettre la recharge des batteries.

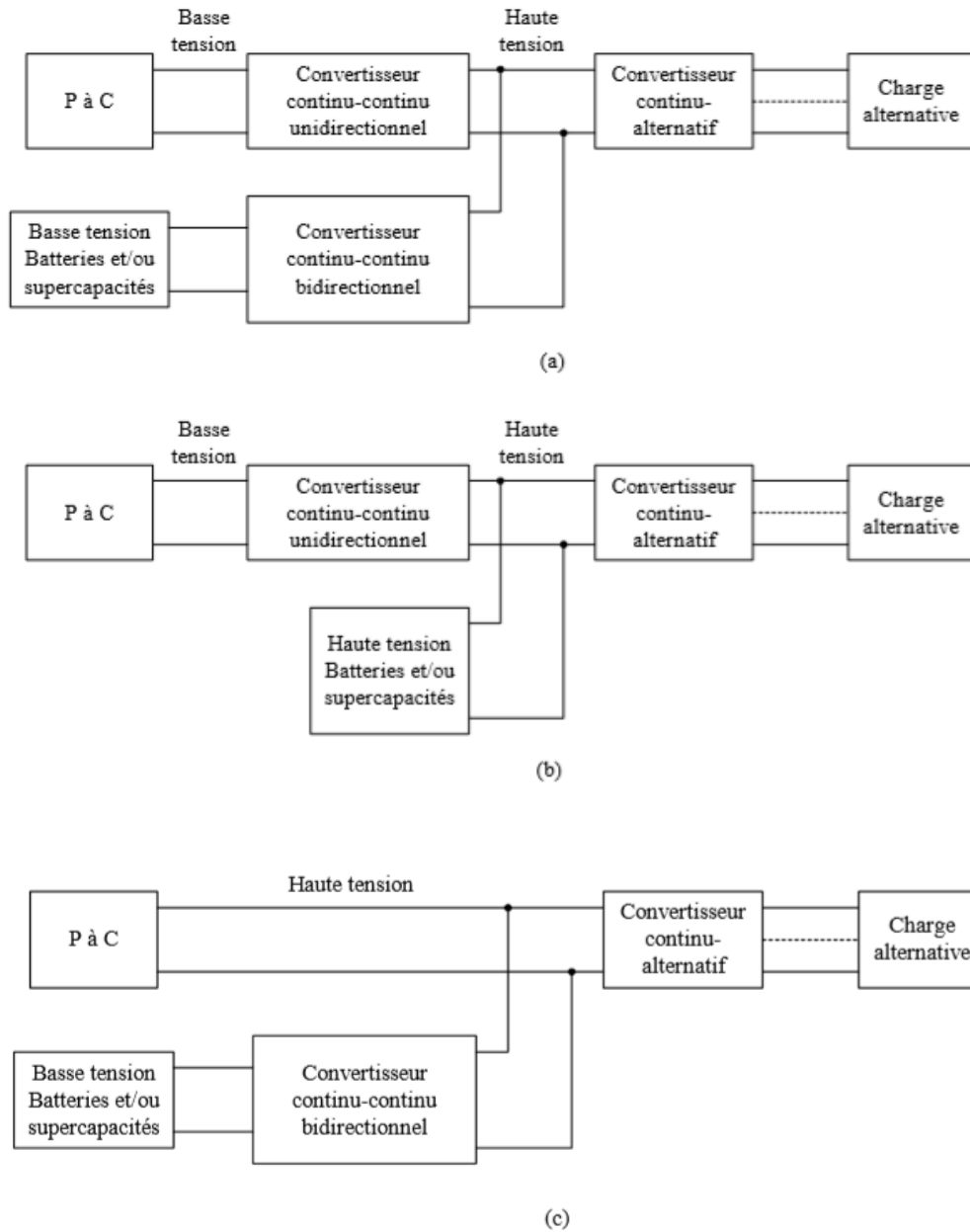


Figure 8: Exemples de topologie des systèmes électriques à pile à combustible [12].

2.2.2. Structures des convertisseurs continu-continu pour la liaison de la pile avec le bus continu S

Dans ce paragraphe, nous présentons les structures de convertisseurs continu-continu souvent rencontrées dans la littérature pour les systèmes à piles à combustible [5]. La simplicité de la plupart de ces structures est justifiée par la recherche de la commodité de réalisation ou le faible coût. Cependant, certaines structures plus complexes conduisent à des performances plus élevées.

Il existe toute une panoplie de convertisseurs continu-continu [12]. Allant des structures de base à conversion directe de l'énergie, en passant par celles à stockage intermédiaire en incluant ou non un transformateur d'isolement, nous nous trouvons confronté à une multiplicité de solutions. Cependant, parmi toutes les solutions envisageables et compte tenu des caractéristiques d'une pile à combustible, quelques propriétés semblent indispensables :

- Le caractère élévateur du convertisseur ;
- La possibilité de régler la tension de sortie du convertisseur indépendamment des fluctuations de sa tension d'entrée ;
- La possibilité de contrôler le courant absorbé par le convertisseur ; - la minimisation de l'ondulation du courant.

Les structures qui autorisent un contrôle du courant de sortie de la pile à combustible sont intéressantes pour ce genre d'application. Elles permettent, en effet, d'avoir un contrôle direct sur la quantité d'hydrogène consommée au travers du contrôle du courant [12], ce qui améliore le rendement global du système.

Quelques exemples d'architectures de convertisseurs pour différentes applications des piles à combustible sont ensuite présentés. Enfin, nous voyons ainsi d'autres alternatives aux architectures classiques que l'on a l'habitude d'employer impliquant une fiabilité accrue et une optimisation de la taille et du poids de ces convertisseurs.

La figure 9 (a) présente la structure de base d'un survolteur. C'est la structure la plus simple. Différents auteurs proposent de segmenter la puissance du convertisseur en plaçant plusieurs convertisseurs identiques en parallèle [7]. La figure 9 (b) présente un convertisseur élévateur

constitué de deux convertisseurs en parallèle. Dans ce cas particulier de l'utilisation de deux convertisseurs, on a en plus la possibilité de coupler les deux inductances [17, 18].

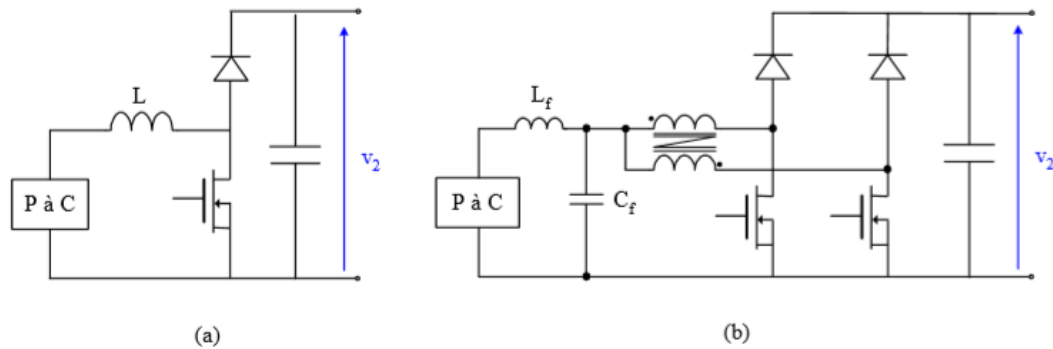


Figure 9: Convertisseur continu-continu. (a) Survolteur de base ; (b) Mise en parallèle de deux survolteurs avec inductances couplées [11].

Dans le cas où nous désirons travailler avec un bus continu haute tension, les montages élévateurs sont limités, d'autant plus que la tension d'entrée de la pile chute lorsque le courant augmente. Nous pouvons donc être amené à s'intéresser aux structures comprenant un transformateur. L'intérêt n'est pas l'isolation galvanique, qui n'est pas indispensable pour ce type d'application, mais l'apport d'un étage élévateur de tension.

On distingue deux types de montage avec transformateur : les montages asymétriques et les montages symétriques.

Dans les premiers, le flux est unidirectionnel (le transformateur est inséré dans une structure hacheur). Les plus connus sont les montages flyback et forward comme représenté à la figure 10. Ces derniers ne sont pas recommandés dans les applications basse tension - fort courant comme c'est le cas des piles à combustible.

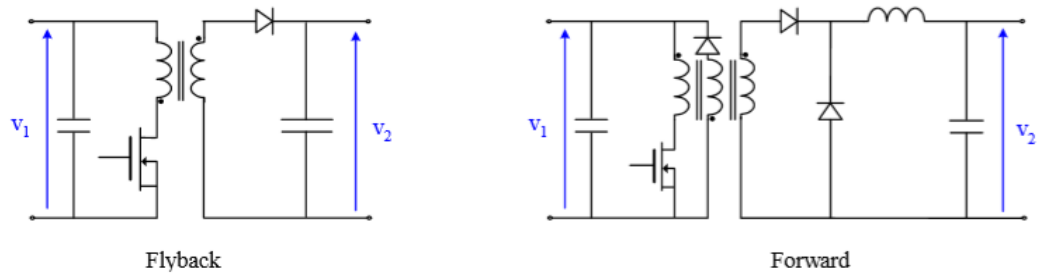


Figure 10: Convertisseurs continu-continu avec transformateur asymétrique, Flyback (à gauche) et Forward (à droite) [6].

Dans les seconds, le flux est alternatif grâce à la présence d'un étage de conversion à sortie alternative comme représenté à la figure 11. Le transformateur, fonctionnant de préférence à haute fréquence pour réduire son volume, est alimenté via un onduleur et est mieux exploité que dans les montages asymétriques.

L'onduleur au primaire du transformateur peut être en demi-point ou en pont complet. On peut aussi utiliser un montage de type push-pull. Ce dernier est une solution bon marché pour des applications de quelques kW [8].

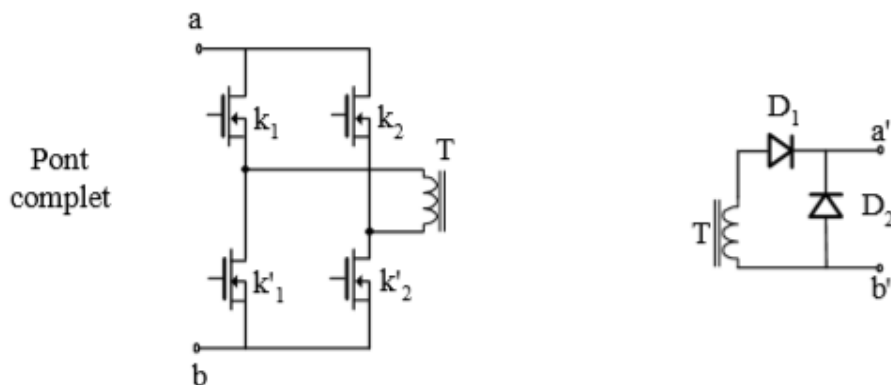


Figure 11: Convertisseurs continu-continu avec transformateur symétrique. Différentes structures, onduleurs (à gauche) et redresseurs (à droite) [7]

Côté secondaire, comme il n'y a pas nécessité de récupérer de l'énergie vers la pile située au primaire, un redresseur non commandé suffit. Il peut être simple alternance avec deux diodes ou double alternance avec quatre diodes en pont ou deux diodes et un transformateur à point milieu.

Toutes les combinaisons sont possibles entre l'un de ces onduleurs et l'un de ces redresseurs.

Afin de réduire les contraintes sur les interrupteurs lors de montée en fréquences de l'onduleur, nous pouvons avoir intérêt à utiliser des convertisseurs à résonance [8, 10, 16]. Dans [8], nous proposons une solution originale mêlant un mode de commutation à zéro de tension et à zéro de courant comme représenté à la figure 12.

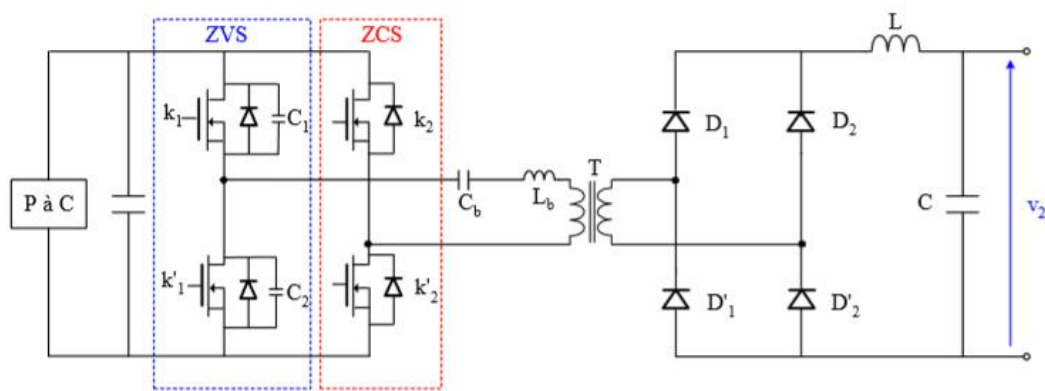


Figure 12: Convertisseur continu-continu. Fonctionnement en commutation douce [11].

2.2.3. Structures des convertisseurs continu-continu pour la liaison batteries ou supercapacités avec le bus continu

Nous sommes toujours en mode de conversion continu-continu mais avec une possibilité de récupération et une nécessité de recharge des éléments de stockage. Dans tous les montages déjà envisagés, nous remplaçons le convertisseur unidirectionnel de l'échange côté sortie, où celui-ci est généralement assuré par des diodes, par des interrupteurs bidirectionnels en courant comme représenté à la figure 13.

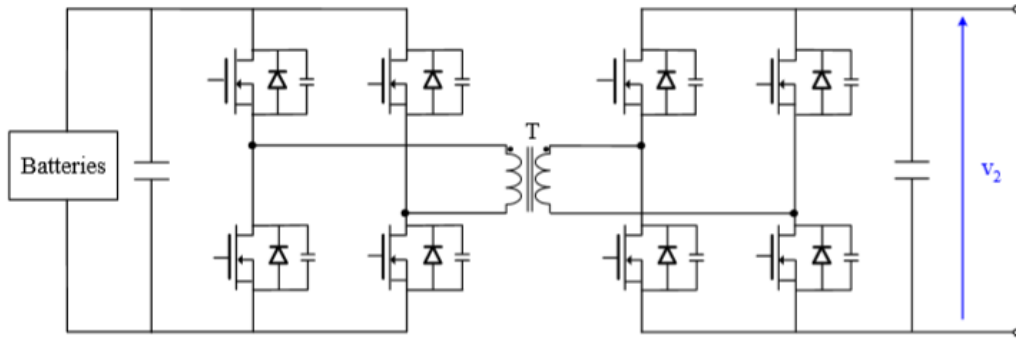


Figure 13: Exemple de convertisseur continu-continu bidirectionnel pour batteries [4].

2. 3 Interconnexion au réseau

Dans cette section, la configuration et deux scénarios du DGS connecté en parallèle au réseau AC seront étudiés.

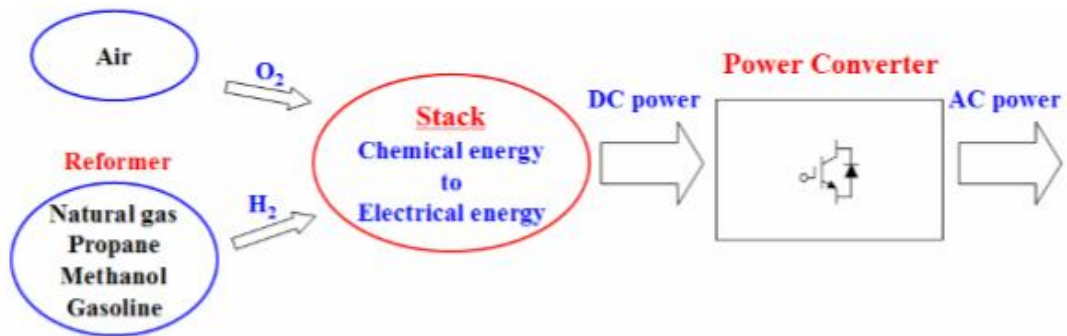


Figure 14: Diagramme bloc du système à pile à combustible [6]

Pour la modélisation dynamique des piles à combustible, le reformeur et l'empilement sont décrits plus en détail car une réponse dynamique des systèmes de pile à combustible est déterminée par eux. La figure 27 montre un schéma fonctionnel du reformeur et de la pile pour illustrer la génération d'énergie CC. Le reformeur affecte la dynamique du système de pile à combustible car

il faut plusieurs à plusieurs dizaines de secondes pour convertir le carburant en hydrogène, en fonction de la demande de puissance. Par conséquent, la dynamique du reformeur peut être représentée par un modèle du second ordre [8] ou un modèle de temporisation du premier ordre [9]. La réponse dynamique de la pile est considérée comme ayant une réponse plus rapide en raison du processus électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène par rapport à celle du reformeur. Sur la figure 15, la sortie de la pile montre une famille de courbes tension-courant pour différents débits massiques d'hydrogène. C'est-à-dire que le courant maximal de la cellule et la tension de la pile augmentent à mesure que le débit massique d'hydrogène augmente. En conséquence, la réponse dynamique du reformeur et de la pile, ainsi qu'une courbe tension-courant de la cellule doivent être modélisées pour une analyse plus réaliste des systèmes de pile à combustible

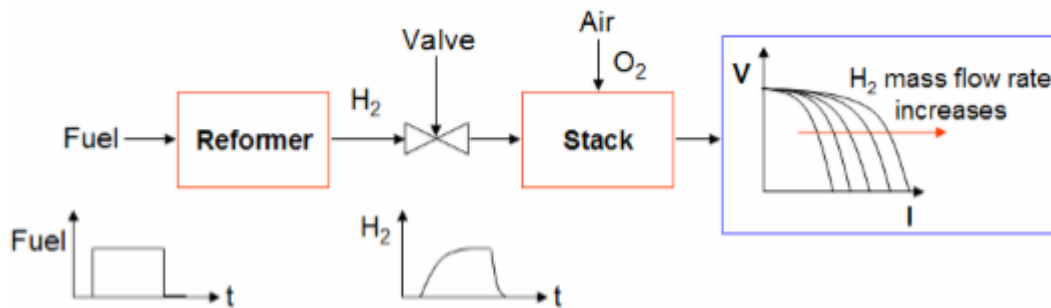


Figure 15: Diagramme bloc du reformer de la pile [11]

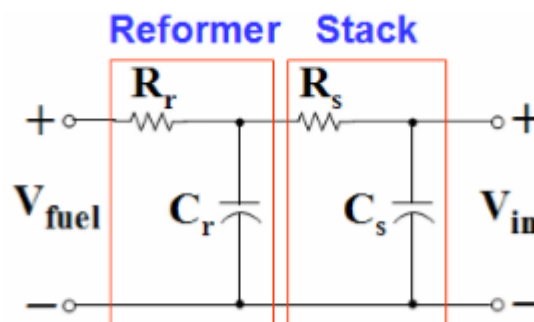


Figure 16: Modèle de circuit électrique équivalent de la PAC [11]

Dans cette recherche, un modèle de circuit R-C est utilisé pour réaliser une dynamique lente causée par une réponse chimique/électrique du reformeur et de la pile, comme illustré à la figure 16.

Comme représenté par la figure 15, le reformeur et la pile sont modélisés par R_r et C_r , et R_s et C_s , respectivement [9]. Dans ce modèle, la courbe de polarisation tension-courant de la pile est également considérée. Le courant de cellule maximal ou la tension de pile pour chaque débit d'hydrogène doit être représenté comme une chute brutale de la tension de cellule due principalement à la privation d'hydrogène. Cependant, dans cette étude, une région ohmique de la courbe de polarisation est utilisée car la pile à combustible fonctionne principalement dans cette région.

2.4. CONCLUSION

En considérant leurs caractéristiques intrinsèques, les piles à combustibles ne peuvent être utilisées comme source d'énergie sans qu'elles soient associées à des batteries et/ou supercapacités et l'emploi de convertisseurs statiques pour alimenter une charge électrique.

Nous réalisons que le choix entre ces architectures résulte de différentes motivations à savoir le niveau de tension désiré, la présence ou non d'éléments de stockage et principalement le coût de l'installation.

Nous avons ensuite présenté quelques structures les plus rencontrées dans la littérature et qui permettent la liaison de la pile au bus continu. Une analyse du fonctionnement du survolteur, de la mise en parallèle de survolteurs et de convertisseurs isolés a été présentée. Il ressort que la mise en parallèle de survolteurs réduit fortement l'ondulation du courant en fonction du nombre de cellules placées en parallèle. De plus, cela permet de segmenter la puissance et ainsi d'utiliser des semi-conducteurs de plus faibles calibres.

Nous avons également remarqué que les structures avec isolation, quoique non indispensables, permettent d'avoir un étage supplémentaire pour élever la tension lorsque cela devient nécessaire pour alimenter la charge électrique.

Le chapitre suivant présente les résultats de simulation.

CHAPITRE 3

PRESENTATION DES RESULTATS DE SIMULATION

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, des bancs d'essai de simulation utilisant Matlab/Simulink seront construits pour valider l'efficacité des modèles de système et des algorithmes de contrôle proposés dans les chapitres précédents. Le chapitre présentera les modèles Simulink et les résultats.

3.2 CONVERTISSEURS DE PUISSANCE DC DC A PONT COMPLET

Pour démontrer le modèle de pile à combustible et le schéma de contrôle présentes pour trois convertisseurs de puissance a pont complet ; un banc d'essai de simulation Matlab/ Simulink est développé.

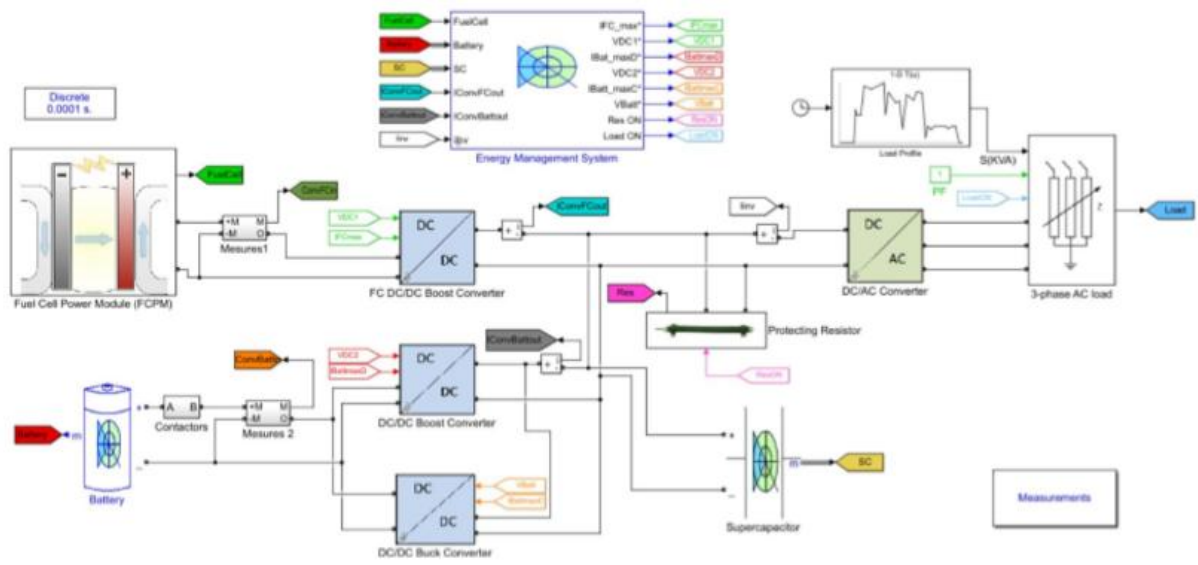


Figure 17: Modèle Simulink de convertisseurs de puissance DC à DC a pont complet avec la pile à combustible et la batterie

Cet exemple illustre un modèle de simulation d'un système d'alimentation de secours à pile à combustible.

La figure 17 montre un modèle Simulink de convertisseurs de puissance DC à DC à pont complet avec la pile à combustible et la batterie, et il se compose d'une pile à combustible, d'un filtre

d'entrée, d'un convertisseur DC à DC unidirectionnel à pont complet isolé, Convertisseur de puissance, une batterie, un pont complet isolé bidirectionnel DC vers Convertisseur d'alimentation CC, et une charge.

Ce système d'alimentation hybride à pile à combustible comprend les éléments suivants :

- Un module de puissance pile à combustible (FCPM)

Un système de batterie

- Un système de supercondensateur Un convertisseur élévateur CC/CC à pile à combustible de 12,5 kW, avec tension de sortie régulée et limitation du courant d'entrée.

- Deux convertisseurs CC/CC pour décharger (convertisseur élévateur 4 kW) et charger (convertisseur abaisseur 1,2 kW) le système de batterie. Ces convertisseurs sont également régulés en tension de sortie avec limitation de courant. Normalement, un seul convertisseur CC/CC bidirectionnel peut également être utilisé pour réduire le poids du système d'alimentation.

Un système d'onduleur de 15 kVA, 270 V CC en entrée, 200 V CA, 400 Hz.

Une charge CA triphasée avec une puissance apparente et un facteur de puissance variables, pour émuler le profil de charge d'urgence MEA.

Une résistance de protection de 15 kW pour éviter de surcharger les systèmes de super condensateur et de batterie.

Un système de gestion énergétique. Répartit la puissance entre les sources d'énergie selon une stratégie de gestion d'énergie donnée. Cinq types de stratégies de gestion de l'énergie sont mises en œuvre, à savoir :

- La stratégie de contrôle de la machine d'état
- La stratégie de contrôle PI classique
- La stratégie de découplage de fréquence et de contrôle de la machine d'état
- La stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS)
- La stratégie de maximisation de l'énergie externe (EEMS)

La démonstration montre les performances du système d'alimentation de secours hybride à pile à combustible ; le système d'alimentation hybride à pile à combustible alimente les charges essentielles lors des événements suivants :

- Instantanément lorsque les générateurs principaux sont perdus (ceci est normalement pris en charge par le système de batterie)
- Démarrages d'urgence

Selon le type de stratégie de gestion de l'énergie choisie, le système de gestion de l'énergie contrôle la puissance de chaque dispositif source d'énergie à travers les signaux de référence (tension de sortie et courant maximum) des convertisseurs DC/DC de la pile à combustible et de la batterie.

3.3 PRESENTATION DES RESULTATS

Ce qui suit explique ce qui se passe pendant cette situation simulée

A $t = 0s$, les charges essentielles sont alimentées par les générateurs principaux et le système d'alimentation hybride à pile à combustible est activé.

A $t = 5s$, la pile à combustible commence à recharger la batterie avec sa puissance optimale (environ 1 kW).

A $t = 40s$, tous les générateurs sont perdus. Le système d'alimentation hybride à pile à combustible prend en charge les charges essentielles. En ce moment la puissance de charge supplémentaire requise est instantanément fournie par le supercondensateur en raison de sa dynamique rapide, tandis que la puissance des cellules augmente lentement.

A $t = 45s$, le super condensateur se décharge en dessous de la tension de bus DC requise (270 V) et la batterie démarre ; fournissant de l'énergie pour réguler la tension du bus à 270V et la batterie démarre fournissant de l'énergie pour réguler la tension du bus à 270V.

A $t = 48,5 s$, la tension du bus DC ou du supercondensateur atteint 270 V et la batterie réduit lentement sa puissance à zéro. La pile à combustible fournit la puissance de charge totale et continue de recharger le supercondensateur, tandis que la puissance de la pile à combustible augmente lentement.

A $t = 61,5s$, la batterie se met en ligne pour réguler la tension du bus continu à 270 V et aide la pile à combustible en fournissant la puissance de charge supplémentaire requise.

A $t = 70\text{s}$, la pile à combustible atteint sa puissance maximale (la puissance du FCPM était limitée à 9 kW du fait de son DC/DC plage de tension d'entrée du convertisseur) et la puissance de charge supplémentaire est fournie par la batterie.

A $t = 110\text{s}$, la batterie atteint également sa puissance maximale (4 kW) et le supercondensateur fournit la charge supplémentaire

A $t = 125\text{s}$, la puissance de charge diminue en dessous de la pile à combustible

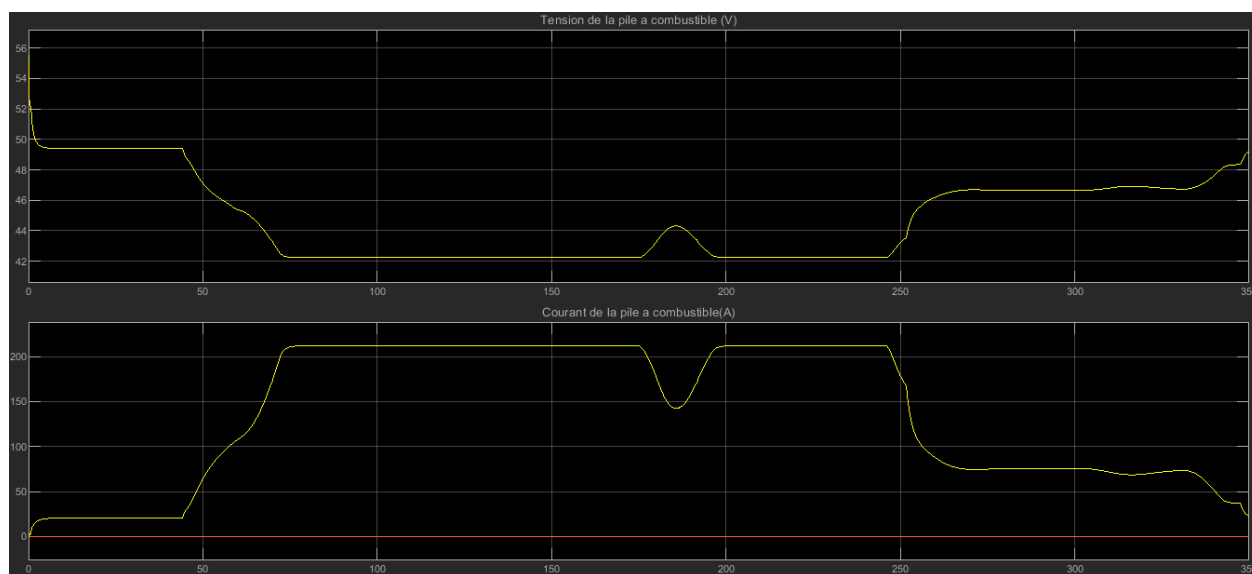


Figure 18: Simulation des formes d'ondes tension-courant de la PAC

La tension de la pile à combustible et le courant de la pile dépendent les uns sur les autres comme courbe de polarisation tension-courant de la pile.

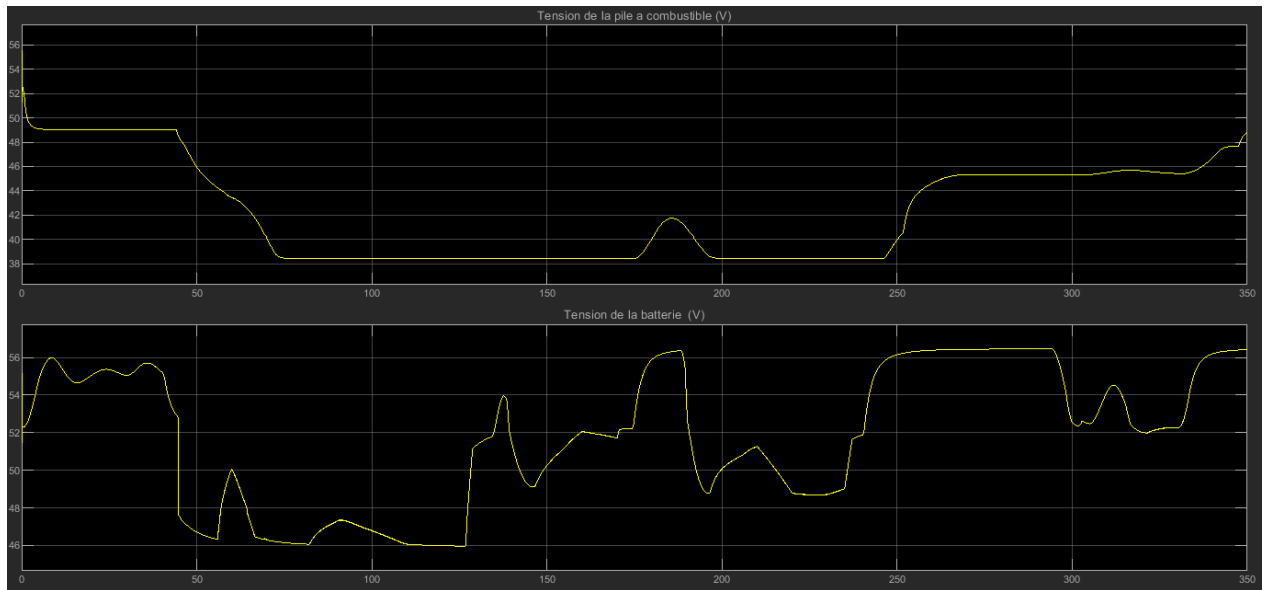


Figure 19: Simulation des formes d'ondes tension du PAC-tension batterie

Dans la Figure 19, la batterie se met en ligne pour réguler la tension du bus continu à 270 V et aide la pile à combustible en fournissant la puissance de charge supplémentaire requise.

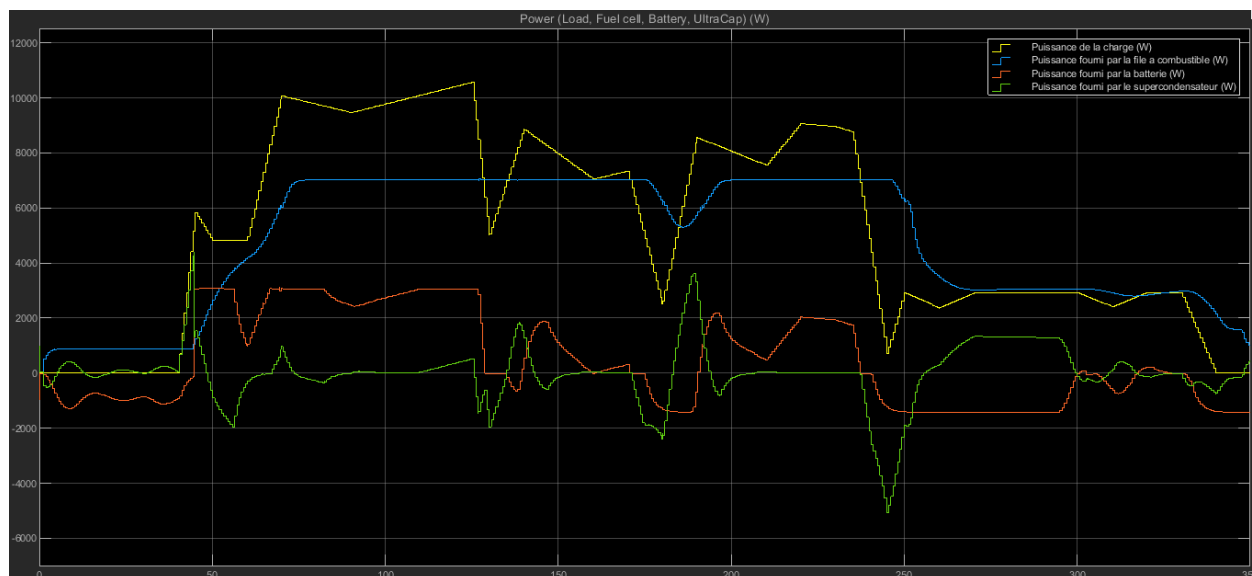


Figure 20: Simulation des formes d'ondes en charge

Comme nous l'avons dit ci haut, le courant de la pile à combustible a un certain retard car il faut un certain temps pour que le carburant soit converti en hydrogène, ce qui est demandé pour la demande de puissance. De plus, le bus de liaison DC est presque constant pendant les transitoires car la batterie sauvegarde de manière appropriée la pile à combustible. La batterie est déchargée lors du démarrage et de l'augmentation brutale de la charge, tandis qu'elle se recharge lentement par la pile à combustible pour atteindre une valeur nominale lors de la diminution rapide de la charge ou en régime permanent. Remarquons les allures des courbes de différentes puissances sur la figure 20.

Dans cette topologie les simulations sont mises en œuvre dans diverses conditions telles que des charges lourdes/légères ; des charges linéaires/non linéaires et des changements de charges soudains.

3.4 CONCLUSION PARTIELLE

Pour éviter de nous éloigner de notre sujet, ce troisième chapitre s'est basé uniquement sur la régulation de la tension de la PAC ; c'est pourquoi nous nous sommes arrêtés aux résultats de simulations des convertisseurs DCDC. Nous comprenons de quelle façon la régulation s'effectue à travers le convertisseur en permettant d'élever la tension de la pile à combustible vers une tension supérieure.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail étudie le modèle de circuit et les stratégies de contrôle pour la régulation de la tension d'une pile à combustible.

Étant donné que le fait de produire une quantité de puissance localement sur un réseau crée des problèmes de tension au point de connexion (élevations de tension), nous avons réalisé que le choix aboutissant à notre travail résulte de différentes motivations à savoir le niveau de tension désiré, la présence ou non d'éléments de stockage et principalement le coût de l'installation.

L'application présentée est une interconnexion au réseau. Tout d'abord, un modèle dynamique de la pile à combustible avec une courbe de polarisation tension-courant de la pile est donné sur la base du processus électrochimique. Deuxièmement, les contrôleurs de deux convertisseurs DC à DC à pont complet sont conçus : un convertisseur élévateur DC à DC à pont complet unidirectionnel pour la pile à combustible et un convertisseur élévateur/abaisseur DC à DC à pont complet bidirectionnel pour la batterie ; enfin un autre convertisseur DC DC pour la charge de la batterie par la pile. Le modèle dynamique de la pile à combustible et deux convertisseurs de puissance DC à DC sont utilisés en commun pour cette topologie. Troisièmement, pour un onduleur CC-CA triphasé sans ou avec un transformateur Δ/Y , un modèle de circuit d'espace d'état à temps discret est donné et deux rétroactions à temps discret.

Dans le deuxième chapitre, ce travail présente la modélisation du système et la conception d'un contrôleur en boucle fermée du convertisseur de source Z qui utilise des composants L et C et des vecteurs nuls pour l'alimentation CA autonome. Le convertisseur de source Z n'a pas besoin des transistors de puissance, des capteurs de tension/courant et un contrôleur DSP dans le cadre d'un convertisseur élévateur CC-CC. En conséquence, il peut présenter certains avantages tels qu'une fiabilité accrue, une efficacité accrue et un coût réduit au détriment de la complexité supplémentaire du contrôle. Le système de pile à combustible est modélisé par un circuit électrique R-C afin d'inclure une dynamique lente des piles à combustible et une caractéristique tension-courant d'une pile est également considérée. De plus, trois contrôleurs de rétroaction à temps discret sont conçus : un contrôleur de tension optimale à temps discret, un contrôleur de courant à mode glissant à temps discret et un contrôleur de tension de liaison CC PI à temps discret. Par conséquent, cette recherche peut être une référence pour ceux qui veulent démontrer le DGS basé sur la pile à combustible discuté dans les chapitres précédents pour des applications industrielles telles que les

systèmes de production d'énergie stationnaires et distribués qui nécessitent une sortie de tension alternative triphasée. À l'avenir, des résultats expérimentaux sur toutes les configurations seront présentés à l'aide d'un prototype de banc d'essai avec une vraie pile à combustible pour vérifier les modèles de circuit et les algorithmes de contrôle proposés.

Bibliographie

- [1] I. D. Landau and G. Zito, Digital control systems: design, identification and implementation. Springer, 2006.
- [2] Energy Challenge 2003, www.energychallenge.org
- [3] N. ROMANI, « Modélisation et Commande du système d’Alimentation en Air pour le Module de Puissance d’un véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur
- [4] K. Agbossou, R. Simard, S. Kelouwani, A. Anouar, T. K. Bose Commande multiphasée d’un survolteur pour un système d’énergie renouvelable. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, mai 2001,
- [5] G. Fontès, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l’étude des interactions avec les convertisseurs statiques », soutenue le 16 septembre 2005 à l’INPT. [
- [6] P.THONTHONG, « CONCEPTION D’UNE SOURCE HYBIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », THESE DE DOCTORAT, L’INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, 2005
- [7] . M.Y. Ayad, M. Becherif, A. Djerdir and A. Miraoui; "Sliding Mode Control for Energy Management of DC Hybrid Power Sources Using Fuel Cell, Batteries and supercapacitors", International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP'07), May 2007, Capri, Italy, pp. 500-505.
- [8] G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg A new green power inverter for fuel cell. Power Electronics Specialists Conference, PESC’02, 2002, vol. 2,
- [9] A. LACHICHI, « Modélisation et stabilité d’un régulateur hybride de courant – Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse de doctorat Université de Franche-Comté, 2005.
- [10] D. A. Nguyen, "Modélisation dynamique du cœur de pile à comb

- ustible de type PEM", thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, juillet 2010. Y. Wang, C.-Y. Wang, "Dynamics of polymer electrolyte fuel cells undergoing load
- [11] M. Garcia-Arregui, C. Turpin, S. Astier, "Direct connection between a fuel cell and ultracapacitors", International Conference on Clean Electrical Power, Capri, May 2007.
 - [12] T. W. & G. SYBILLE, "ELECTROTECHNIQUE," 4 e edition,, Paris, 2015.
 - [13] A. K. 2. e. S. D. 2. S. khenfous 1, «Optimisation du dimensionnement d'un système hybride,» Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°2 (2017) 267 - 284, p. 18, (reçu le 10 Juin 2017 - accepté le 30 Juin 2017).
 - [14] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir Piles à combustible. Technique de l'Ingénieur, D 3 340-1/28.
 - [15] J. Larminie, A. Dicks Fuel Cell Systems Explained. Second Edition, ISBN 0-470-84857-X, 2003